## 生物系における核融合と同位体変換

## Mir 出版社



#### \*\*\*\*\*\*日本語版について\*\*\*\*\*\*

本訳書は «В.И. Высоцкий, А.А. Корнилова, Ядерный синтез и трансмутация изотопов в биологических системах, Москва, Издательство «Мир», 2003, 302 с.» のロシア語原文からの翻訳である。ただし、本訳書はインターネット上に公開されている PDF版(全157頁)を訳したものである。原著書は全302頁であるので, PDF版は原著書を大幅に縮約したものと思われる。PDF版は下記の訳者のサイトでも入手することができる。

著者: ウラジーミル・イワノヴィッチ・ヴィソツキー (Владимир Иванович Высоцкий, Vladimir Ivanovich Vysotskii) アーラ (アリビナ)・アレクサンドロヴナ・コルニロワ (Алла (Альбина) Александровна Корнилова, Alla (Albina) Aleksandrovna Kornilova)

著者の経歴: 巻末の「訳注 著者紹介」を参照されたい。

訳者: 吉田 正友(サイト「物理の旅の道すがら」<u>http://naturalscience.world.coocan.jp</u>) 日本語版公開: 2020年6月

- \* 訳文中の角括弧 [ ]内は訳注である。
- \* 技術的な理由により、日本語版に掲載されている図表の一部に細部が読み取りに くい箇所ある。鮮明な図表が必要な場合は原文の PDF 版を参照されたい。

2		1/
ა	日	伙

# 目 次

第1章	まえがき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
第2章	生物系における化学元素.変換効果の歴史・・・・・・・・・・・・	9
第3章	生物系の同位体組成とその影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	15
第4章	同位体と化学元素の変換に関する実験的研究・・・・・・・・・・・・・	19
4.1.	実験方法と用いられる生物学的対象物の選択・・・・・・・・・・・・・	19
4.2.	増殖中の生物培養物中における同位体の制御変換に関するメス	
	バウアー分析法および質量分光法による複合的研究・・・・・・・・・	20
	4.2.1. 微生物培養物中における同位体変換に関するメスバウアー	
	分光法による研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	21
	4.2.2. レーザー飛行時間型質量分析計を用いた増殖中の微生物	
	培養物中における軽同位体と中間質量同位体の制御変換	
	に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	27
4.3.	増殖中の培養物中における平均原子番号の同位体の制御変換の	
	観測と質量分光学的研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
	4.3.1. 作業方法と研究方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
	4.3.2. 結果と考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	33
4.4.	増殖中の微生物培養物中における重同位体の変換の観測および	
	変換過程の制御方法に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	35
	4.4.1. セシウムが増殖中の生物培養物中における中間質量同位	
	体と重同位体の核変換効率に及ぼす触媒的影響・・・・・・・	35
	4.4.2. 増殖中の生物培養物中における重同位体の変換の検出・・・・	39
	4.4.3. Sr, Cl および S が生物培養物中における変換過程の効率に	
	及ほす複合作用の解明・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	40
第5章	生物糸における常温同位体変換過程の物理学的側面・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	45
5.1.	何電粒子の関与トにおける 低エネルギーでの 無閾値核融合反応	
= 0		45
5.2.	「常温移融合」現象・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	47
	5.2.1. 加速セブル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	49
	5.2.2. 電子遮敝によるクーロン陣壁の減少・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	49
	5.2.3. 結晶格士の関与下におけるコヒーレント効果と十渉効果・・・・	49
	5.2.4. 原丁核のノエルミ疑縮と小一人疑縮・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	50
	5.2.5. 桁前俗子のノオノンによつし促進された反応・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	50
	5.2.6. エキソナツク化子····································	50
	5.2.7. 里い (トノンスミューオン) 松士による 触媒作用・・・・・・・ <b>5.2.0</b> 由州マの佐田玉にわける 巨広	50
	5.2.8. 中性子の作用下にわける反応・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	50
БЭ	3.2.5. 行共な似効末・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	50
5.5.	生初末にわりる「市価核融口」境家の美苑の特殊性・・・・・・・・・	50
	5.5.1. 土物末にわりる市価収融日の天死の行業なアカーハムは 左左するか?	50
	(行任) るか: ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	50
	3.3.4. 圧雨 こうについつ取過車」 ロックシンアルオアナにわける無暗時核融合のあり得スメカーブト	52
	のるボ学生(M型ロッの) (日のクターハム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	54
	シーリオシート	67
		04

目 次

第6章	生物系における同位体変換過程の化学的・生物学的前提・・・・・・・	64
6.1	. 生物学的対象物の元素組成と増殖中の培養物中における制御融	
	合の問題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	64
6.2	. 微生物と金属の相互作用の特殊性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	67
6.3	. 微生物と金属の相互作用の生物学的意味・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	70
6.4	. 必須微量元素の生化学的アナログ. 微生物の代謝と制御変換の	
	問題 • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	72
6.5	. DNA 修復と同位体変換の問題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	81
6.6	. 生物学的対象物の適応, 微量元素の類似性と同位体融合――生物	
	進化の法則性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	83
第7章	生物系における同位体変換現象の利用の見通しとあり得る方法・・・・	84
7.1	.病因学的に微量元素欠乏に起因する疾患の予防と治療を目的と	
	する同位体変換現象の利用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	84
7.2	. 同位体変換現象にもとづくバイオテクノロジーの方法による希少	
	軽・重安定同位体の製・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	86
7.3	. 生物系における同位体変換現象を利用した放射性廃棄物のリサ	
	イクルの可能性について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	89
	7.3.1. 長寿命同位体Sr <sup>90</sup> のリサイクルのための反応・・・・・・・・	96
	7.3.2. 放射性同位体Zr <sup>95</sup> のリサイクルのための反応・・・・・・・・	96
	7.3.3. Nb <sup>95</sup> のリサイクルのための反応・・・・・・・・・・・・・・・	96
	7.3.4. 高レベル放射性同位体Ru <sup>103</sup> およびRu <sup>106</sup> のリサイクルの	
	ための反応・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	96
	7.3.5. 高レベル放射性原子核Sb <sup>125</sup> のリサイクルのための反応・・・・・	97
	7.3.6. 高レベル放射性同位体I <sup>131</sup> のリサイクルのための反応・・・・	97
	7.3.7. 計量・探傷検査に利用される高レベル放射性同位体Co <sup>60</sup>	
	のリサイクルのための反応・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	98
	7.3.8. 高レベル放射性同位体Kr <sup>85</sup> のリサイクル・・・・・・・・・・	98
	7.3.9. 高レベル放射性同位体Sc <sup>46</sup> のリサイクル・・・・・・・・・・	99
	7.3.10. 高レベル放射性同位体Mn <sup>54</sup> のリサイクル・・・・・・・・・	99
	7.3.11. 高レベル放射性同位体Ar <sup>39</sup> のリサイクル・・・・・・・・・・	99
	7.3.12. 高レベル放射性同位体S <sup>35</sup> のリサイクル・・・・・・・・・・	99
7.4	. あとがき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	100
文献・		101
[訳注]	] 著者紹介・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	116
[付録]	] 21 世紀の錬金術師たち (アレクサンドル・プロスヴィルノフ)・・・・	118

4

## 第1章 まえがき

歴史全体にわたって人類とともに歩んできた様々な「永遠の問題」の中で、物質的 世界の単一性と相互変換という問題が常に主要な地位の1つを占めてきた。哲学者、 錬金術師、詩人、そして物理学者がこの問題を解こうとしてきた。元素を変換させ、 遂には黄金を得ることを可能にする力を持つ「賢者の石」の探求は、人類文明史の最 も暗い時代[西洋中世]においても続けられた。「信仰と思想の純粋性」を要求した異端 審問により、科学の殉教者たちがいけにえを焼く火の中に進んで行くといった事態が しばしば生じたが、しかしそれでも彼らは明晰な思考を捨てようとはしなかった。新 たなるものの創造者たちの多種族混成社会の中には、人類の理性の力を真に信じてい る者もいたが、どの時代にも、すべてをいっぺんに実現することを請け合い、「需要が 供給を生む」の原理にもとづいて行動する山師やいかさま師が存在していた。そして その需要とは、いつの時代も黄金であった。

それは科学の「黄金の子供時代」であった。この時代には、科学全体が、ただ単に 何か少数のバリエーションを一つ一つ吟味していけば、それによって必ず成功に導か れるという、単純素朴な子供じみた確信の上に基礎をおいていた。何かと何かを混合 し、そこにさらに何かを添加すれば十分なのであって、そうすれば、期待される目的 は今回ではないにしても、いつかは必ず達成されると考えられていた。

しかし,科学の進歩はその歩みをとめどなく前へと進めていった。19世紀,特に20 世紀は,科学の成果のおかげで,すべての物事をそのあるべき場所に配置したように 見えた。世界はより認識しやすくなった。原子と原子核の構造が発見されたことによ り,物質変換の問題は完全に具体的な問題に転化した。科学はきわめてプラグマティ ックになった。それと同時に,「科学の闘士」(今回は,「科学の純粋性」のために闘う 闘士)という新たなカースト [排他的特権階級]が出現し,彼らのみが真理に対する独占 権を持つようになった。

問題はきわめて明確に設定された。「一般に承認されている」規範 [canon] に合致し ていないすべてのものは、異端である(これは異端審問の時代への逆戻り以外の何も のであろうか?)。「一般的承認」という言葉の定義には、しばしば、「科学者共同体」 がそうみなしていることを主張すること、という意味が補足される。例えば、熱核融 合に関する専門家の多数派が、常温核融合は不可能であると主張している場合には、 それが他ならぬ真理なのである。かつては、そのような過程の原理的可能性に関する 自らの意見を表明し、その結果、「疑似科学」を支持したかどで非難されることを恐れ ずにいられたのは、A.D.サハロフやJ.S.シュウィンガーといったノーベル賞受賞者レベ ルの最も傑出した科学者のみであった。

しかし,我々の同時代人はあらゆる点で異端審問の原理に従ったわけではない。我々 の時代には、科学の規範についておおっぴらに議論することができるようになった。 そして直ちに、それらの規範の一部は無条件に正しく、おそらく、(少なくとも、自然 に関する我々の理解のレベルにおいては)本質的な見直しの対象とはならないことが 明らかになった。例えば、諸保存則と因果原理はゆるぎなく残っている(ただし、こ こにおいてさえ、一定程度慎重な姿勢を取る必要がある。なぜなら、エネルギー保存 則が妥当するのは不確定性関係までの精度においてであり、決定論的因果原理は一連 の場合において確率論的因果原理に取って代わられつつあるからである)。言うまで もなく、それらの基本法則をアプリオリに否定している理論は十分な根拠を持ってい ない(少なくとも、それらの法則が確実に働いている対象物や現象との関係において は)。それ以外の科学規範は、それらを普遍的法則に転化し、既知のあらゆる物理現象 に適用しようとする試みは存在するものの,神話化された規範,あるいは科学上の知 識や発見の特定のレベルに対してのみ合致する規範であることが判明した。

「正しい科学」と「正しくない科学」への科学の区分の基礎には、そのような理解 があった。例えば、超伝導は 30K を超える温度においては原理的に存在し得ないとい う「確実に証明された」主張(高温超伝導の発見とともに、この主張は見事に忘れ去 られた)、また、 $Z = 114 \sim 118$ の「安定の島」の限度を超える安定核は存在し得ないと いう「確実に証明された」主張(最近では、この主張も放棄しなければならなくなり つつある)は、かつては「普遍的」規範に分類されていた。

さらにもう1つの科学的神話化行為は、高エネルギーにおいては、核相互作用の性格はその周囲の物体からの影響に依存しないというアプリオリな主張に関するものである。しかし、あらゆる巨視的・微視的物体には波動的性質がある(この性質が相互作用のローカルではなく、グローバルな性格をもたらしている)。それゆえ、上記の主張の考え方は、論争の余地がないわけではけっしてない。このことを特に物語っているのは、マトリックスの巨視的性質に対するガンマ線放射と核相互作用過程の一義的依存性を示したメスバウアー効果である。それだけでなく、チャネリング条件下において相対論的電子と規則格子が相互作用するときには、粒子の波動的性質は、粒子のエネルギーが大きいほど、より強く(!)発現するというのである。この種の実験的「トリック」が多数存在しており、それが科学のいたる所で見受けられる。

科学は、事実上、自分の職業的利益領域におけるローカルな真理に対する独占権を 握ることを欲する科学界の派閥同士の間で「分断」された状態となった。「一般に承認 されている」見解とは異なるラジカルな見解を持つ「よそ者」の立ち入りは、科学者 共同体によって厳しく罰せられてきた。

しかし、それにもかかわらず、科学に宿る生命は自らの正常なコースを進んだ。科 学界の高位聖職者たちが定めたプロクルステスの寝台に横たわろうとしない実験家の 数が増大した。ある時期までの間に、上記の類の実験を、無視したり、あるいは制御 不可能な初期条件や機器誤差によって説明したり(これは最良の場合である)、あるい はまた、あからさまな捏造と呼ぶことができるようになった。公平を期するために、 故意の捏造も存在していたことを指摘しておかなければならない。実に、人間とは弱 く、未完成な存在である。しかし、捏造された結果は、科学の「正貨準備 [gold reserve]」 には入り込まなかった。そして、科学界の高位聖職者たちによって許可を与えられた 構想の枠組みからはみ出す事実の数がある臨界質量を超えたとき、それらの事実を認 識し、それらに対して根拠にもとづいた説明を与えることが必要となった。

ところで、普通ではない事実は多数存在する。それらはしばしば表面上に直接的な 形で見えているが、時には深い所に隠れている場合もある。異常な観測事実が特に多 数得られているのは、科学の様々な分野(例えば生物学、物理学、化学)が密接に、 かつ普通とは異なった形で絡み合っている学際領域においてである。概して言えば、 タンパク質の存在様式として理解されている生命自体が、大きな謎である。生命は、 カオスの世界の中に秩序を創出する反エントロピー過程である。この過程を大きなゆ らぎとみなすことは、本質的には何も説明していない。

生命活動の過程にかかわるすべてのことは、それに劣らず謎めいている。DNAの安定性に注目していただきたい。DNA分子の場合、局所的条件や培地の組成と無関係な 突然変異の確率は10<sup>-7</sup>以下である。様々な外的条件のスペクトル全体の範囲内におい て行われるこの生命再生産の確実性を、この過程を制御する DNA ポリメラーゼの活動のみによって説明することは不可能である。培地中に必須化学元素が存在しない場合もあり、外的条件が変化する場合もあるが、そのような場合でさえも、歪曲や突然 変異を伴わない再生産過程が変わりなく同じように大きな効率で進行するのである!

超強力な放射線場でさえ、再生産過程を撹乱することはできない。Deinococcus Radioduransの培養菌は、10 Mrad を超える線量をもたらす放射線場中において快適 と感じ、増殖し、突然変異を起こさない。多くの構造材料は、そのような放射線負荷 に耐えることができない(マイクロエレクトロニクス情報工学の基礎をなしている結 晶シリコンのような構造材料については言うまでもない。結晶シリコンはそのような 負荷を受けると完全に劣化し、そのユニークで有用な性質を失ってしまう)。ところが、 遺伝子情報にもとづいた複雑極まりない生体物質は、生きて、発育するのだ! 生物体 は、その高い安定性を維持するための内部制御無生物界の物体には存在しない、信頼 性の高いある種の自己調節因子——を持っているのではないかという印象が生じてく る。それはいかにして生じているのか? その内部「メカニズム」はどこにあるのか? 自己調節の限界はどの程度なのか? それらの過程を制御することは可能なのか?

我々は、上記において立てられた疑問のうちのいくつかについて考察し、それに答 えを与える試みを行った。その試みにおいては、増殖中の生物系 [biological system] にお ける元素の核変換を実現する能力を持つメカニズムが検討された。そこでは、明らか に「原子炉とは異なる」条件(室温、常圧すなわち大気圧、中性子および高エネルギ 一荷電粒子の非存在)の下で核変換過程を高い効率で行う能力を持つ、天然の微小原 子炉として生物体を理解する試みが実際になされた。

外的条件に対して脆弱で敏感であるように見える生細胞が、少なくとも無生物界の 物体における過程と比肩し得るような効率で実現することが明らかに不可能である、 その核変換過程を行う能力を持っているのはなぜなのか? 生細胞はいかにしてそれ を行っているのか? 生細胞は何のためにそれを行っているのか?

これらの疑問に答えるに当たり,我々は確実に解明された事実のみから出発し,現 代科学の諸方法に依拠した。我々は新たな神話をでっち上げることはせず,「必然的な ものを超えた本質を創り出さない」という基本原理から出発し,しばしばなされるよ うにそれぞれの新事実のためにラジカルな新理論を導入するのでなく,既に検証済み の方法にもとづいてすべての事実を説明するよう努力した。この理由により,我々は, ここで考察されている現象の総体を「生物学的変換」と呼ぶことができるとは考えて いない。このような呼び方は,この現象の本性の表現としては半神話的なニュアンス を持つ(伝える)ことになり,事の本質をまったく反映していない。実際には,生物 系における核(同位体)変換は厳密な物理法則に従って進行している。ただし,その 際には,物質代謝のいくつかの動力学的法則と生体の構造が核変換の一種の量子力学 的触媒の役割を果たし,それらによって核(同位体)変換が促進されているのである。

我々の研究においては、増殖中の生物系における同位体の変換過程は、次の3つの 側面から検討されている。

1) 常温同位体変換に関する実験的事実の総体として

2) 具体的な核物理学的基礎にもとづいている過程,したがってそれにもとづいて分析されるべき過程として

3) 生物系における生化学的過程として

我々は、自然は単一であり、それゆえ、生物ダイナミクスにおける諸過程をスタテ ィックな周囲媒質中における諸効果から切り離し、両者を対置することは無意味であ ることを、我々の理解の程度に応じて示そうと努めた。それと同時に、我々が望んだ のは、我々の主要な着想に従い、他ならぬダイナミックで自己組織化可能な生物界の みが、物質の進化に関する多数の問題に答えを与えることが可能であることを示すこ とであった。

最後に, 我々は, これらの研究に参加してくださった我々の友人と同僚に心から謝 意を表したい。I.I. Samoilenko, S.I. Reiman, G.A. Zykov, A.B. Tashirev, R.N. Kuzymin, E.S. Vasilenko, A.V. Syroeshkin, A.M. Pokidyshev との活発な協力は,この本の出現を促進してくれた。全ロシアセミナー「常温核融合の諸問題」の参加者およびその指導者 Yu.N. Bazhutov と N.V. Samsonenko にも,長年にわたって同位体変換の問題に関する 「励起的な」議論を交わしてくれたことに感謝したい。

## 第2章 生物系における化学元素 変換効果の歴史

「原子核以前」の科学の時代における化学元素の変換と融合の問題は、その独自の 歴史、神話、その支持者と反対者を持っている。この問題自体が出現したのは、かな りの程度まで、錬金術時代が存在し、錬金術時代についての批判的分析が行われたお かげである。錬金術においては、化学過程に関する合理的な経験的知識と、中世にと って伝統的な神秘主義とが奇妙な形で混じり合っていた。結局、その知識が神秘主義 に打ち勝ち、近代化学のうちにその構成部分として入った。化学の基本法則が次第に 定式化されていった。しかし、それらの法則に従うと、元素変換の可能性に関する問 題を設定すること自体が反法則的であるということになった。それらの法則は、いく つかの量(それらの量の中ではエネルギーが最も重要な位置を占めている)と固く結 びついている。このような事情が、変換が出現する領域を著しく狭い範囲に限定した。 しかし、それは変換という過程を禁止したわけではない。生物学的対象物中における 化学元素の変換という問題は、中世の科学だけでなく、それに続く「原子核以前」の 科学においても関心の範囲外にあったことに注目する必要がある。このことは、生物 対象物をその周囲の無生物対象物と対置していた当時の神学的理解とかなりの程度ま で関係している。

そのような状況は 1930 年代まで変わることなく続いていた。原子核の構造と核内 相互作用の本性に関する認識が深まるにつれて,元素の化学的性質はほとんどもっぱ ら価電子の挙動によってもたらされているにもかかわらず,それらの元素の本性自体 は(さらに究極的には外殻の価電子その他の電子の特性も),同位体の原子核の特性と 関係していることがますます明らかになった。

生物学的対象物中における化学元素(同位体)の変換に関する実験の歴史において は、この方向性における系統的研究を初めて行ったルイ・ケルヴランの一連の研究 (Kervran, 1963, 1966, 1968, 1998)が特別の位置を占めている。

ケルヴランは各種の生物学的対象物の増殖過程におけるそれらの化学組成の異常変

化のきわめて多数の例を挙げ、その挙動を化学元素の変換という理解にもとづいて説明している。

例えば,最も重要な反応の1つとして,水素の存在(陽子の関与)の下における生物系におけるカリウムのカルシウムへの変換反応

#### $K^{39} + p^1 = Ca^{40}$

が検討された。

ケルヴランが挙げている実験的依存性は、その過程を説得的に例証している(図 2.1)。 種子の発芽過程においてカリウムとカルシウムの含有量が変化していることが示された(840 個の種子が分析され、そのうち 403 個の芽が成長した)。カリウムの質量減少分( $\Delta M_k = -0.033 g$ )とカルシウムの質量増加分( $\Delta M_{Ca} = 0.032 g$ )の大きさがほぼ等しいことが見て取れる。それと同時に、マグネシウム(Mg)の質量は事実上変化していない。

ケルヴランはそれ以外の多数の同位体変換反応についても検討を行った。それらの 反応の中では、必須元素 Ca, K, Mg, Pの形成を伴う、生命活動の過程にとって最も重要 ないくつかの反応、すなわち

 $Mg^{24} + O^{16} = Ca^{40}$ Si<sup>28</sup> + C<sup>12</sup> = Ca<sup>40</sup> Na<sup>23</sup> + O<sup>16</sup> = K<sup>39</sup>



図 2.1. K, Ca および種子の成長時における Mg(中央)の含有量の変化。左 側と右側は 3 回のシリーズ別の測定結果と平均結果

 $Na^{23} + p^1 = Mg^{24}$  $Mg^{25} + Li^6 = P^{31}$ 

および1分子の範囲内における変換反応

 $N_2 \rightarrow CO$ 

を挙げることができる。最後に挙げた反応は、次の2段階の同位体変換に対応している。

 $_{7}N^{14} + _{7}N^{14} \rightarrow _{6}C^{12} + _{0}n^{1} + _{1}p^{1} + _{7}N^{14} \rightarrow _{6}C^{12} + _{8}O^{16}$ 

ケルヴランはこの反応を、 $N_2$ 分子中における陽子と中性子の、一方の窒素原子核から他方の窒素原子核への(一方の窒素原子核の炭素への変換および他方の窒素原子核の酸素への変換を伴う)移行の過程とみなしていた。さらに、この過程は生物系における炭素欠乏という条件下で生じることができるという予想が述べられた。

融合反応Na<sup>23</sup> + 0<sup>16</sup> = K<sup>39</sup>の進行を裏づけるため, ケルヴランは既に発表されていた 実験データ(Julien, 1959)を検討した。この実験データによれば、食塩 NaCl を 1.4% 含有する水に魚(テンチ)を入れたところ、4 時間の間に KCl の総濃度が初期値の 3.95 g/L から 5.40 g/L へと 36%増加した。その時間におけるテンチの血中における NaCl と KCl の含有率の変化を図 2.2 に示す。

ケルヴランはこのような例を多数挙げている(それには植物学、応用農学、養禽学 その他の領域における例が含まれている)。その際、彼は不安定元素の安定元素への変 換を用いて放射性廃棄物のリサイクルのために生物系を利用する可能性にも特別の注 意を払っていた。ケルヴランはその可能な例として、化合物HgCl<sub>2</sub>の形の放射性同位体 Hg<sup>203</sup>(半減期 46.6 日)を含有する培地における *Klebsiella aerogenes* の培養増殖過程



図 2.2. 魚 (テンチ)を 1.4% NaCl 水溶液に入れたときの魚の血中における Na, K および Ca の含有率の変化

を検討している。それらの実験結果(Magos, 1964)は、増殖中の培養物を含んでいる 系内における放射能の減衰は、16時間にわたって自発的自然減衰の場合に期待される 速度より速く進行していたことを示した。放射能測定には普通のガイガーカウンター が用いられた。この研究の著者らは、放射能減衰法則からのこの逸脱を物理的過程— 一放射性水銀を含有する化合物の系からの分離、すなわち揮発——によって説明して いた。ケルヴランは、この場合に観測されたのは放射性同位体Hg<sup>203</sup>の非放射性原子核 への変換効果であったという推測を述べている。

以上をまとめると、ケルヴランは、歴然たる算術の規則、すなわち陽子数のバラン スを核子との反応に適用する方法によって元素と同位体のあり得る変換スキームを分 析していたと指摘することができる。このようなアプローチは、(弱い相互作用を考慮 すると、それに随伴して核子同士の相互変換が生じる可能性があることを見逃すこと にすれば)特別の反論を呼び起こさない。

それとともに、原子核の構造およびその変換経路に関するケルヴランのモデル的理 解は、核物理学に関する一般に受け入れられている現代的理解からきわめてかけ離れ ている。

特に、上記において分析されている反応

#### $_{7}N^{14} + _{7}N^{14} \rightarrow _{6}C^{12} + _{0}n^{1} + _{1}p^{1} + _{7}N^{14} \rightarrow _{6}C^{12} + _{8}O^{16}$

を検討する際、ケルヴランは、 $N_2$ 分子中における陽子と中性子の、一方の窒素原子核から他方の窒素原子核への移行は、未知の酵素の力の励起作用を受けたとき、細胞表面上または細胞内で生じているとみなしていた。これは、あらゆる新たな未知の効果を新たな未知の酵素によるものとする、典型的な生化学的手法である。そのような方法(新たな酵素を公準として設定する方法)は、事実上何も解決せず、いかなる答えも与えないが、その代わり、何か科学的アプローチであるかのような見せかけを与えてくれる。

しかし、この場合には、そのような方法は明らかに受け入れがたい。なぜなら、任意の酵素の作用は外殻電子に対するその影響によってもたらされ、0.1~0.5 eVのレベルのエネルギー作用のスケールに対応しているのに対し、核変換の場合は100 keV 以上(!)の作用が必要とされるからである。

さらに,次の点を指摘する必要がある。ケルヴランは、(ただ単に化学元素の変換の みを検討するのでなく)他ならぬある特定の同位体の変換を検討することの意義とそ の変換の特異性を理解していたにもかかわらず、彼が発表した著作においては、その 特異性はしばしば純粋に形式的な性格を持っていた。そしてそれは、核変換過程の本 質そのものの反映というよりは、むしろ、形式的記述を完全にする必要性から生じた 報いであった。

同位体組成の特異性に対する形式的態度というこの事実は、彼がしばしば用いてい る変換過程の可逆性という概念を導入すると、直ちに明らかになる。その概念を導入 することにより、ケルヴランは、核物理学においては受け入れがたい閾値上における 反応の可逆性をさしたる根拠もなく公準として設定することができた。しかし、そこ ではエネルギー保存則が破られている。

例えば、ケルヴランは、外的条件が変化したとき(例えば、周囲媒質中のカリウム とカルシウムの含有率が逆転したとき)、カルシウムからカリウムへの変換反応の逆 反応、すなわち

 $K^{39} + p^1 \leftrightarrow Ca^{40}$ 

が進行する可能性があることを公準として設定した。

しかし、この過程やこれに類する過程の可逆性はエネルギー保存則と両立しない。 Ca<sup>40</sup>の正反応の場合には、変換の各事象当たりΔE = 8.326 MeVのエネルギー放出が生 じ、この反応はエネルギー保存則によって禁じられていないのに対し、逆反応は閾値 上における反応であり、出発原子核Ca<sup>40</sup>がそれと同じ8.326 MeVを下回らないエネルギ ーを受け取ったときにのみ進行することができる。温度T ≈ 300~340Kの条件下に存在 し、発育しつつある生きた培養物がゆらぎによってそのような追加的エネルギーを受 け取る確率は、

 $W \approx \exp(-\Delta E/KT) \approx 10^{-100000000}$ 

という想像もつかないほど小さな数となる。すなわち,宇宙においては,宇宙の存在 時間全体をつうじて,そのような励起が生じる事例は1つたりとも見出されないので ある! そのような逆反応が事実上絶対に起こり得ないことは明らかである(特に,そ の反応が多数の原子核において同時進行する場合)。

ケルヴランの著作においては、そのような不正確な例を少なからず見出すことがで きる。例えば、ケルヴランの意見によれば生体系中において進行することが可能であ るとされ、彼によって分析されている同位体の正分裂反応

 $\begin{array}{l} \mathrm{Cl}-\mathrm{O}\rightarrow\mathrm{F}\\ \mathrm{P}-\mathrm{Li}\rightarrow\mathrm{Mg}\\ \mathrm{Ca}-\mathrm{O}\rightarrow\mathrm{Mg}\\ \mathrm{Fe}-\mathrm{H}\rightarrow\mathrm{Mn} \end{array}$ 

は閾値上における吸熱反応であり、原子番号が減少する上記の方向に、各1回の変換 当たり 5~20 MeV というきわめて大きな追加的エネルギーを吸収することによっての み進行することができる。そのような過程を未知の酵素の作用に帰着させることはで きない。そのような自由エネルギーの源は生体系中には存在しない!

放射性同位体Hg<sup>203</sup>を含有する培地の放射能現象の過程に対するケルヴランが提唱 した解釈に関しても、それと類似した論拠を述べることができる。その解釈における 結論は、実験において16時間にわたって観測され、記録された放射能減衰法則(Magos, 1964)にもとづいていた。その原子核の自発崩壊のスペクトルは、エネルギー214 keV の高速電子とエネルギー279 keV のガンマ量子の放出と一致していた。Hg<sup>203</sup>の非放射 性同位体への高速変換に関するケルヴランの解釈を採用した場合,最も自然なのは, そのような変換過程には,何よりもまず培地中における濃度が最大である同位体,す なわち水素の原子核p<sup>1</sup>と酸素O<sup>16</sup>の原子核も関与していると予想することである。すな わち,

 $Hg^{203} + p^1 = Tl^{204}$ 

 ${\rm Hg^{203}} + 0^{16} \rightarrow {\rm Hg^{219}} \ (\tau = 0.01 \ \text{s}, \ {\rm He^4}) \rightarrow {\rm Re^{215}} \ (\tau = 0.002 \ \text{s}, \ {\rm He^4}) \rightarrow$ 

 $\rightarrow$  Po<sup>211</sup> ( $\tau = 0.5$  s,  $\tau = 0.25$  s)  $\rightarrow$  Pb<sup>207</sup>

その結果,不安定長寿命同位体 $Tl^{204}$  ( $\tau = 3.78 \text{ yr}$ )が形成され,  $\alpha$  粒子の放出を伴う 核変換の連鎖が生じる。その最終結果は鉛の安定同位体のうちの 1 つの形成である。

これらの反応は放射能の減衰を実際にもたらすことができるかもしれないが、しか しこの実験の条件下ではこれらの反応が存在することはできない。これらの反応はす べて閾値上における反応であり、大きな追加的エネルギー(陽子が関与する反応の場 合は 8.2 MeV,酸素が関与する反応の場合は 39.4 MeV)を必要とする。その追加的エ ネルギーは系内には存在せず、したがってそのような反応は原理的に存在し得ない。

おそらく、より現実的な予想は、培養物の増殖のある時点における放射線カウント 数の減少は、増殖中の培養物のあり得る空間的再分布およびそれに伴う非定常的不均 質性(非一様性)の出現その他の空間的・時間的効果と関係しているという予想であ ろう。例えば、増殖の結果培養物の質量が増大すると、(キュベットの)表面近傍層内 において、その領域におけるHgCl2塩の濃度の自然減少が生じ(塩は別の領域へ押しや られる),そのため,Hg<sup>203</sup>の崩壊産物の高速電子が通過しなければならない表面まで, またその先のガイガーカウンターまでの経路長が増大する。その結果,同位体Hg<sup>203</sup>に よって放出される高速電子の培地バルク中における減速が生じ、結局、培地の範囲外 に出るそれらの電子の流れは減少する。水中における電子の大きな加速は、事実上、 表面近傍層内に存在する放射源によって放出される電子しか記録されないという結果 をもたらす。ガイガーカウンターを用いた記録は量子と高速電子を区別することがで きないことを考慮すると、この条件下においては培地の放射能の減衰が記録されるこ とになる。(例えば代謝産物による培地の有害化によって) 培養物の増殖が終了した後 においては、増殖を終えた培養物の沈殿または培地のバルク全体における均質化が生 じる可能性があり、このことが直ちにHgCl。塩のバルク全体における再分布および表面 近傍層内における培養物濃度の自然増加をもたらはずである。すなわち、高速電子数 の増大が記録され、自発減衰の法則はもはや破られない。自明のことながら、これは 自発減衰の非指数関数的依存性からの逸脱を説明する可能性のある複数のシナリオの 1 つにすぎない。それゆえ、生物系による放射性同位体の非放射性同位体への変換に よるそれらの処理効果が存在することを裏づけるためには、精緻化のための実験と代 替メカニズムに関する検討を行う必要がある。処理効果に関する一義的な結論を下す ためには、培養増殖の終了後に培養物あるいは培地の同位体組成を測定する必要があ る。しかし、ケルヴランの著作に挙げられている例外なしにすべての実験データは、 化学(元素)分析のみによって得られたデータである。同位体の変換と関係している 原子核変換反応以外には、いかなる原子核変換反応もあり得ないにもかかわらず、ケ ルヴランが分析または実施した安定同位体または放射性同位体の変換に関する多数の 実験のうち、変換反応産物の同位体分析が行われた実験は1つもなかった!

実は,化学元素という概念自体は,相異なる同位体の総体を論理的に一般化した便 宜上の形式にすぎない。それゆえ,ある相互作用を検討する際にそのような一般化を 行うことができたとしても,別の相互作用の場合には,そのような一般化を適用する ことは原理的にできない! このことは,特に,同じ化学元素の相異なる同位体の間に おける性質の近似性が,相異なる元素の同位体の間における性質の近似性と少しも違 わない場合における核物理学的過程に対して当てはまる! しかし,ケルヴランが分 析した実験と例のうちどの1つにおいても,初期(反応開始前)と終期(反応終了後) における相対的同位体組成の測定は,その測定なしに変換反応について語ることは無 意味であるにもかかわらず,行われていなかった。化学的分析方法を用いて得られる データは元素組成に関するデータに限られる。しかし,変換過程においては常に,他 ならぬ同位体組成が変化しているのである!

ケルヴランの実験を直接引き継いだのは、彼の弟子である小牧[小牧時久](Komaki, 1965,1967,1992)による、増殖中の微生物培養物中における化学元素変換過程の研究 をテーマとする研究であった。その研究に対してはケルヴランの研究に対するのと同 じ指摘をすべて適用することができる。小牧も他ならぬ同位体の変換を研究したが、 しかしその実験のうちどの1つにおいても、初期(反応開始前)と終期(反応終了後) における相対的同位体組成の測定は行われず、研究は化学元素比の変化の測定のみに 限られていた。

ケルヴランが与えている変換効果という独自の名称に関してさらにもう1つの指摘 をする必要がある。そのすべての著作において,彼は元素の変換過程を生物学的変換 現象と呼んでいる。彼は変換プロセスの本質をまさにそのように理解していた。彼は 特に,すべての物理法則は無生物界においてなされた実験から導き出されたものであ るから,特異な生物学的法則は物理法則に直接的に帰着させることはできないと主張 していた。

我々の意見によれば、同位体と元素の変換過程を生物学的変換とみなし、その過程 を物理法則にもとづく同位体変換過程としての変換の物理概念から区別するためのい かなる根拠も存在しない。我々は、観測されるすべての同位体効果は、(それらが現実 に生じており、正確で確実な測定によって裏づけられている場合には)同位体と元素 の「普通の」変換過程として特徴づけることが可能であり、その過程が生物系におい て進行しているのだから、その過程の効率は他ならぬその生物系によって決定されて いると考える。核過程の進行を促進することを可能にするような生物学的対象物の何 らかの特異性が存在するか否かの問題については、変換過程の理論的側面をテーマと するこの後の章において詳しく検討される。増殖中の微生物培養物中における変換の 際、融合反応を進行させることが可能なのはいかなるメカニズムかという問題もそこ で検討される。

## 第3章 生物系の同位体組成とその影響

以上の検討から分かるように、生物系における化学元素の変換過程とは、何よりも まず同位体の核変換過程である。同位体は生物系の生活環にとって特異な重要性を持 っているのであろうか? 生物系は他の自然対象物における同位体比と異なる同位体 比を持つことができるのであろうか?

設定されたこれらの問題に答えるに当たっては、代謝に関する一般的データを検討 するだけでなく、同位体変換時における同位体組成の変化に関するデータを導入する 必要がある。変換の研究に際して確実なデータについて語ることができるのは、系内 における変化が、各種同位体の物理的・化学的性質の違いに起因する同位体の自然変 動から生じる任意の逸脱を著しく上回っている場合に限られることは明らかである。

一見したところ、生命活動の過程とは基本的には価電子が関与する生化学的過程の 総体であり、原子核の同位体組成は価電子に対して著しい影響を与えないのだから、 具体的化学元素の同位体組成は生体の生命活動に対して著しいを与えるはずがなく、 それゆえ、同一の化学元素のすべての同位体は生物系においてほぼ同様の仕方で発現 するはずであるように思われる。同位体標識法の基礎にはこの単純なアプローチが横 たわっている。重要な意味を持っている「標識原子」法はその同位体標識法の個別的 な場合であり、そこでは「標識」として放射性同位体——同一の化学元素の安定同位 体の化学的アナログ[類似体] ——が利用されている。

生物対象物中の同位体比は無生物由来の化学元素における同位体比と一致している はずであると当然期待するべきである。しかし,直接的実験は各種の生体中における 同位体組成の著しい逸脱を検出しており,しかも同位体組成が一連の生命過程に対し て著しい影響を与えている。

同位体異常をもたらすいくつかの基礎的メカニズムを区別することができる。それ らのメカニズムの一部は文献(Galimov, 1981)において詳しく検討されている。

1. 運動論的同位体効果は、同一の熱エネルギーのときの相異なる同位体の原子(分子)速度の違いによってもたらされる。このメカニズムには、より重い同位体が関与して形成される化学結合はより軽い同位体が関与している化学結合よりも強固であることに関連したいくつかの効果も分類される。それらの結合の強固さにおける違いは、単純な量子力学的根拠を持っており、任意のより重い粒子のエネルギー準位が、その粒子と隣接粒子の相互作用を特徴づけるポテンシャル井戸内において、より軽い粒子の状態を決定づける準位よりも低い所に位置していることによってもたらされている。実際、このことは位相体積の最小単位量(量子)

 $\Delta \Gamma = \int d^3 p \int d^3 x = (2\pi\hbar)^3$ 

(ここでp = mVは粒子の運動量)の不変性によってもたらされている。粒子の質量が 増大すると、(その他の条件が不変のとき)粒子の局在化の範囲が法則的に減少し、  $\int d^3 \sim 1/m$ となり、このことが粒子がポテンシャル井戸の底により近い所に存在する ことを可能にする。この事実がより重い粒子の活性化エネルギー $E^*$ の増大をもたらし、 熱刺激反応 [thermally stimulated reaction]の速度を減少させる。すなわち、

 $v/v^* = \sqrt{(m^*/m)\exp[-(E - E^*)]/kT}$ 

このことにより、反応産物は軽同位体に富んだものとなり、反応に関与しなかった 残余部分は重いものとなる。

2. 熱力学的同位体効果は、より軽い同位体の場合と比べ、より重い同位体の存在が

系の自由エネルギー量を減少させることと関係している。前項の効果と同様,この効 果は,系の全体的な力の場の中においてより重い同位体のエネルギー準位がより低い 所に位置していることとかなりの程度まで関係している。

3. 核スピン同位体効果は、スピン依存過程の進行の特徴と関係している。すなわち、 この効果は究極的にはパウリの原理によって決定されている。このメカニズムの主な 特徴は、原子や分子が外殻電子(したがって原則として価電子)を通じて相互作用す るということにある。しかし、複合系(例えば原子核+電子)に対して量子統計的アプ ローチを取った場合には、すべての電子と核の総スピンが決定的契機となる。こうし て、核スピンの変化(これは各種の同位体において生じる)が原子や分子の統計的分 布と相互作用に対して直接的な(しかもきわめて著しい)影響を与える。

4. 立体配座効果は、周期的に秩序化される原子系や分子系の場合において、核質量の同位体変化が生じたとき、原子や分子の空間構造の小さな変化が大きな蓄積効果を もたらす可能性があることに起因している。そのような効果は、例えば空間的に秩序 化された大きな生物分子と重水または軽水が相互作用するときに生じる。これについ てはこの先においてより詳しく検討される。

生物学においては、いくつかの最重要元素――炭素、酸素、水素、窒素、イオウ― 一の場合における同位体比の変動が詳しく検討されている(例えば(Galimov, 1981))。 例えば炭素の同位体比C<sup>12</sup>/C<sup>13</sup>の自然変動

 $\delta_{\rm C} = \{({\rm C}^{12}/{\rm C}^{13}) - ({\rm C}^{12}/{\rm C}^{13})_{\rm standard}\}/({\rm C}^{12}/{\rm C}^{13})_{\rm standard}\}$ 

は 12%に達する。それに対し, 生体中におけるその大きさの変動はそれより 1.5~3.5% 小さい。同位体比( $C^{12}/C^{13}$ )<sub>standard</sub>の標準標本としては, 白亜紀の古生物 *Belemnitella americana* の化石化した遺骸が選ばれた。大気中二酸化炭素の同位体組成は $\delta_{C} =$ -0.7%に相当し, 堆積性炭酸塩岩は $\delta_{C} = -0.5$ %から $\delta_{C} = 0.5$ %までの自然変動によっ て特徴づけられることを比較のために挙げることができる。生体の場合には,  $\delta$ の区間 は各種の生化学的成分ごとに異なっている。例えば, 脂質は軽同位体に富んでおり(脂 質の場合,  $\delta_{C}$ は $\delta_{C} = -0.8$ %から $\delta_{C} = -3$ %までの区間内にある), タンパク質と炭水化 物の場合,  $\delta_{C}$ は(平均すると)バイオマス全体の $\delta_{C}$ 値と等しい。

同位体比の標準としては、水素と酸素の場合は世界の大洋の平均同位体比(SMOW), 窒素の場合は空気中窒素の同位体比、硫黄の場合はキャニオン・ディアブロ隕石(MCD) のトロイライト相のイオウ同位体比が採用されている。

酸素の(2つの主要同位体に関する)同位体比 $\delta_0 = \{(0^{16}/0^{18}) - (0^{16}/0^{18})_{standard}\}/(0^{16}/0^{18})_{standard}$ は、大気中二酸化炭素では $\delta_0 = 4.1\%$ である。大気中酸素は重同位体  $0^{18}$ に富んでおり、 $\delta_0 = 2.4\%$ である。これは平均して $\delta_0 = 0$ である海水の酸素同位体 比を上回っている。水媒質中においては、二酸化炭素の酸素は水の酸素との間で熱力 学的同位体平衡状態にある。水生植物の同位体組成は  $1.4\sim2.8\%$ の区間の $\delta_0$ に相当し ている。陸上植物の同位体比は生息環境の温度に著しく依存している。外部温度が高 いときには、水蒸気の蒸発と関連した生体中の重同位体の濃縮が生じる。全体的には、陸上植物は $\delta_0 = 1.5\sim3.5\%$ の値によって特徴づけられる。

水素同位体の場合には、同位体効果は特別の意味を持っている。周知のように、水 素の安定同位体(HとD)のユニークさは、それらの質量が2倍異なっていることに ある。比較のために挙げると、生物学にとって重要な元素の安定同位体の間における 質量の違いは1~7%を上回らない。水素同位体の質量のそのような違いの結果、自然 分画によるそれらの同位体の分離度はきわめて大きなものになることができる。それ だけでなく、それらの同位体は生化学反応において相異なった振る舞い方をする。そ の違いは、生物分子に対する軽水と重水の作用の分析において特に明確に現われる。 現在,水の構造は水素結合の三次元四面体系と一致しており,氷の構造と同一であることが確実に立証されているとみなされている。

液体の水と氷の構造の主な違いは、格子の熱振動の作用下でそれらの結合の一部が 解離することにある。氷においては水分子1モル当たり水素結合2モルの割合である のに対し、赤外分光データ(Bujis, 1963)によれば、氷が融解するとき、水素結合の 46%が解離する。そのとき、2つの水素結合を持つ分子は全分子のわずか33%となり、 1つの水素結合を持つ分子の割合は41%、水素結合を形成しない分子の割合は27%と なる(ここでは1分子の陽子と隣接分子の間の水素結合のみが注目されている)。水 素結合の解離は、氷の三次元構造の空隙の、水分子による充填をもたらす。分子のパ ッキングはより密となり、このことが座標数の増加をもたらす。水分子の間における 水素結合形成の協同的メカニズムが、水をそれ以外の液体と異なったものにしている 水のきわめて重要な性質、すなわち水の構造の会合的性格を決定づけている。

このように、室温のとき、水中におけるあり得る水素結合の半分以上は解離している。しかし、水素結合の形成は協同的性格を持っているため、解離した水素結合が分子全体に一様に分布している状態は好適な状態ではない。水素結合の閉鎖過程は最小エネルギーに対応している。このことが、微小領域内において、1分子当たり最大数の水素結合を持った会合体、したがってまた、そのような最大数の水素結合を実現させる氷の構造に近い構造を持った会合体の形成をもたらす。そのような会合は不安定であることが判明する。エネルギーの局所的ゆらぎがそれらの会合の崩壊、そして新たな秩序化された会合体、すなわちクラスターのゆらぎ的発生をもたらす。クラスターの寿命は10<sup>-10</sup> sのオーダーであり、これは約10<sup>3</sup>回の分子振動に相当する。

そのような「生成・消滅クラスター」モデル [«flickering cluster» model] は Frank と Wen (Frank, 1957, 1958)によって初めて検討され, その後, Némethy と Scheraga (Némethy, 1962)によって発展させられた。そして現在, これがおそらく最も徹底的に検討され た水の構造モデルとなっている。

水素結合の三次元四面体系のパラメーターが(「生成・消滅クラスター」のパラメー ターと同様に)水分子の質量とサイズに依存しており、その質量とサイズが「軽い」 水(H<sub>2</sub>0)の場合と「重い」水(D<sub>2</sub>0)の場合では異なっていることは明らかである。

DNA とそのような偽結晶水の相互作用を考慮に入れた系においては、普通の水(軽水)の構造は DNA の構造との間で理想的な形で整合している。これは進化の過程から 生まれた結果である。

水の除去は DNA の二重らせんのように強固な構造さえもの破壊をもたらす。おそらく、この問題が最初に詳しく検討されたのは論文(Sutherland, 1957)においてである。脱水された DNA 分子の構造は変性した分子の構造にきわめてよく似ているが、しかし、吸収した水の含有率が乾燥重量の 50%になり、すなわちヌクレオチド1 個当たりの水分子の数が 10 個になり、相対水分が 75%になると、完全に修復される。

普通の水(軽水)を重水に代えると、水の偽結晶構造とDNAの表面の構造の空間的 周期の間の不整合が生じ、このことが直ちに縦方向の(DNAの軸に沿った)変形応力 とDNAの縦方向周期の変化を引き起こす。

DNA 合成時におけるそのような変形はきわめて重要な意味を持っている。なぜなら, その際に発生する歪んだ相補的ヌクレオチド対が, DNA 合成過程を制御する DNA ポ リメラーゼによって欠陥(突然変異体)として受け取られ,このことが相補的ヌクレ オチド対の消滅をもたらすからである。複製過程の遅滞と突然変異ヌクレオチド対の 発生がそのような作用の結果となる。

おそらく,DNAの周期的構造と重水の周期的構造の間におけるそのような空間的不 整合化のメカニズムこそが,水の組成中における水素を重水素に代えたときの同位体 効果の主要な発現因子の1つとなっているのであろう。

化学元素の原子番号と電荷が大きくなっていくにつれて,同位体組成が生化学的過程に及ぼす影響の発現における相対的な差はますます顕著さの度合いが低下していく。 このことは、中間質量元素と重元素にとっては、無生物環境中の同位体比と生物対象物中の同位体比は事実上同一となるという結論に自動的に導く。

このように、軽元素の場合における同位体比の「標準」値(その場合 $\delta_X = 0$ )からの

$$\delta_{\rm X} = \left\{ \left( {\rm X}^{\rm A + \Delta A} / {\rm X}^{\rm A} \right) - \left( {\rm X}^{\rm A + \Delta A} / {\rm X}^{\rm A} \right)_{\rm standard} \right\} / \left( {\rm X}^{\rm A + \Delta A} / {\rm X}^{\rm A} \right)_{\rm standard} \approx \pm 3 \sim 5\%$$

の範囲内における逸脱は完全にあり得ることであるとみなすことができる。この同位 体効果は、具体的な化学元素のそれ自身の同位体による自然濃縮過程または自然希釈 過程と関連している可能性があり、系内における核変換の進行を物語ってはいない。 同位体比の変化の純粋に核的な本性(核変換)という問題が生じることが可能なのは、 化学元素の同位体比の逸脱が10~20%を超える大きさである場合に限られることは明 らかである。

## 第4章 同位体と化学元素の変換に関する実験的研究

#### 4.1.実験方法と用いられる生物学的対象物の選択

相互作用する原子核の相対運動エネルギーが低いときの物理学的,生物学的および 地質学的系内における化学元素(同位体)の核変換の可能性に関する仮説は,最近数 十年間にわたって再三論議されてきた。このテーマに対する関心が高まったのは,固 体中における dd 反応をベースとする常温核融合現象に関する体系的研究が開始され てからのことである。しかし,これまで行われた実験のどれ1つとして,常温核融合 の存在を裏づける,完全に信頼できる繰り返し性のある結果を与えていない。

我々の意見によれば、それは研究方法と研究対象の選択の不首尾に起因している。

我々は、それに従ったとき、変換過程の促進と検出のための最大数の条件が満たさ れるような方法論を最適な方法論とみなす。すなわち、

1)変換過程において得られる同位体は、開始時点(実験の実施より前)には、常温 核融合タイプの核変換が生じる媒質(培地)中に含まれていてはならない(または、 その同位体の初期含有量が、初期成分および終期産物中において不純物として高い精 度でコントロールされなければならない)。

2) 融合される同位体は媒質(培地)中に蓄積されなければならない(そのためには, その同位体は揮発性化学元素に相当するものではないことが必要である)。

3) 融合される同位体の当該原子核は、同じまたは隣の原子核の隣の不純物同位体から当該原子核を(質量数の点で)著しく異なったものとするような特性(スピン、核内共鳴遷移、磁気モーメント)を持っていなければならない。

4) 記録方法は、一方では最大の感度を持っているとともに、他方では予想される核 反応の結果形成される同位体を、化学的特性が近い不純物元素と不純物同位体をバッ クグラウンドとして確実に区別することができること、すなわち、明確に表れた共鳴 特性を持っていることを特徴としていなければならない。

これまでに行われた dd 常温核融合現象の検出実験の大部分は,以上の要件に適合 していない。それらの実験は,最も軽い同位体が関与する核融合反応,すなわち

 $d^2 + d^2 = He^3 + n^1$ ,  $d^2 + d^2 = T^3 + p^1$ 

における中性子、トリチウムまたは熱効果にもとづいている。

これらの反応において、記録される中性子放射の強度は宇宙放射によって生じるバ ックグラウンド値を超えていなかった。したがって、予想されるトリチウムの蓄積量 は重水D<sub>2</sub>0中におけるトリチウムの初期不純物含有量を超えておらず、また熱効果も 大部分の場合、普通の電気化学的過程として説明されていた。

生物培養物中における軽化学元素の変換に関する小牧の実験は,まさに上記の要件 を満たしていなかった(彼の実験では,初期および終期の化学組成と同位体組成,不 純物含有量がコントロールされていなかった)。

また、それぞれの個別的な記録方法が測定過程の絶対的確実性を確保できていない ことも明らかである。例えば、質量分光法は高い感度を持っているが、しかし一連の 場合において、実験結果の解釈の非一義性をもたらす可能性がある。例えば、重同位 体イオンの質量スペクトルは、それと同じ質量数を持つ多原子分子イオンの質量スペ クトルと少ししか違わない。その代替となるメスバウアー共鳴ガンマ線分光法は同位 体を常に一義的に同定する。しかし、メスバウアー効果自体はきわめて限られた数の 同位体に対してしか適用することができない。

測定の信頼性と確実性の向上は,適切な分光法(特にレーザー質量分光法。この方 法では高温プラズマ条件下で分子が個別原子イオンの状態になるまで解離される)を 利用することによってのみ達成することができる。その際,測定は相異なるタイプの 複数の分析計を用いて行うべきである。

研究対象の選択も常温変換過程の最適化のための条件と関係している。研究される 生物学的対象物が、大きな増殖速度(急速な質量増加)という特徴を持ち、互いに独 立した多数の対照研究を行うことを可能にし、生息環境の温度と化学組成に対してあ まり敏感ではないという条件を満たしていなければならないことは明らかである。そ れだけでなく、今後におけるさらなる最適化を考慮すると、その生物学的対象物は放 射線の作用、すなわち各種の電離作用を持つ場(ガンマ線放射、高速電子、中性子、 等々)による外部照射と内部照射に対して低い感受性を持っていることが望ましい。

諸要件のそのような総体に応えることが可能なのは、外部条件への適応可能性という点で生物界における無条件の記録保持者である微生物学的対象物のみであることは明らかである。例えば、*Deinococcus radiodurans* といったユニークな培養物は10<sup>6</sup>~10<sup>7</sup> radの放射線負荷に耐えることができる。このことは他の生物対象物の中に類似物を持たず、この培養物を放射性同位体の変換に関する主要候補として検討することを可能にする。

予想される反応および最終結果として得られる同位体のタイプの選択も最適化の対 象である。エネルギー閾値による制限を受けておらず,低エネルギーで進行すること が可能であり,具体的な生物学的対象物の特異性によって課される様々な制限と良く 整合する,魅力的な融合反応が多数存在する。それらの反応の選択は,かなりの程度 まで研究者の直観および問題の理解の仕方と関係している。さらに,資源と時間の制 約性から出発して検討しなければならない。こうして我々は,最大の確実性と今後に おけるさらなる最適化という観点から見て目的に適っているのは,第一段階において は,様々な経路によって鉄同位体をもたらすような反応の総体をあらゆる側面から研 究することであるという結論に達した。本研究においては,そのような課題が解決さ れる。この結論は、とりわけ,筆者らがメスバウアー効果,また(その技術の60~80% の部分が)他ならぬ鉄同位体の1つをベースとしているメスバウアー分光技術を良く 知っていることと関係している。それと同時に、本研究においては、同じ培養物中に おいて鉄の融合とは無関係に副次的に進行するそれ以外の反応も検討される。

## 4.2. 増殖中の生物培養物中における同位体の制御変換に関するメスバウアー 分光法および質量分光法による複合的研究

行われた研究の目的は、増殖中の生物培養物中における常温同位体変換の進行の可能性の検出と研究であった(Vysotskii, 1996)。

我々は、一義的な記録の必要性を要件の基礎において検討を行った結果、我々の最 初の実験においては同位体Fe<sup>57</sup>をベースとしたメスバウアー効果を利用することが目 的に適っているという結論に達した。鉄は大部分の生体の組成に含まれている。重要 なのは、「普通の」同位体Fe<sup>56</sup>と希少なメスバウアー同位体Fe<sup>57</sup>とが、生物学的対象物 にとっては同一であり、区別することができないが、しかし核物理学的に検討すると、 それらはまったく相異なった原子核であるという事実である。

我々は、変換結果の研究の可能性を考慮し、生物学的同位体変換に関する実験の第

21 第4章 同位体と化学元素の転換に関する実験的研究

1シリーズを互いに独立した複数の方法によって実施した。

それらの実験の基礎をなしていたのは、マンガン塩が付加的に添加された重水D<sub>2</sub>O をベースとする鉄欠乏水-塩培地において増殖する微生物学的培養物中における予想 されるメスバウアー同位体Fe<sup>57</sup>の融合反応

#### $Mn^{55} + d^2 = Fe^{57}$

であった。マンガンの疑う余地のない長所は、それが安定同位体(Mn<sup>55</sup>)を1つしか 持っていないということである。この事実が実験結果の解釈を一義的なものにする。

予想される核融合反応の結果,自然界における含有率が 2.2%ときわめて小さい希 少な安定同位体Fe<sup>57</sup>が形成されるものと推測された。

この反応が持つ明らかな利点は、Fe<sup>57</sup>は最もよく研究されたメスバウアー同位体で あるため、メスバウアー効果を用いてきわめて容易に同定することが可能であるとい うことである。この同位体の蓄積は、(少なくとも将来的に)融合反応の効率と長さが 増大したとき、変換過程の時間的法則性を解明することを可能にする。それだけでな く、同位体Fe<sup>57</sup>の自然含有率は小さいため、その融合は、鉄同位体の相対的分布の変 化の分析にもとづき、従来の質量分光法を用いてきわめて容易に記録することができ る。

#### 4.2.1. 微生物培養物中における同位体変換に関するメスバウアー分光法による研究

実験は複数の細菌培養物(*Bacillus subtilis GSY 228, Escherichia coli K-1, Deinococcus radiodurans M-1*) および酵母培養物(*Saccharomyces cerevisiae T-8*) にもとづいて行われた。これらの培養物の選択は、実験的に検証された重水をベースとする培地におけるそれらの増殖可能性、また上記において指摘した、強い放射線場の存在下での変換過程において放射線耐性を持つ *Deinococcus radiodurans M-1*の培養物を将来的に利用する可能性との関連において行われた。

典型的な実験シリーズには複数の逐次的操作が含まれていた。

遠心分離処理を行い、蒸留した軽水(H<sub>2</sub>0)中で入念に洗浄し、事前の成長促進処理 を施すことによって事前に得られた培養物を、基礎となる(対照実験と変換実験の両 方において用いられる)成分である Mg 塩、Ca 塩、K 塩、酒石酸アンモニウム、ショ糖 および純水 10 mL(変換実験では重水D<sub>2</sub>0、対照実験では軽水H<sub>2</sub>0)を含有する所定の 糖-塩培地が入っているキュベットに入れた。培地の組成を表 4.1 に示す。

含有率のコントロールが行われなかった不純物の影響を排除(緩和)するため,培 地の作製には「CP」(化学的に純粋)の等級の試薬が用いられた。すなわち,どの実験 においても培地中の Fe 含有量は $\Delta m_{Fe} \approx 1.1 \cdot 10^{-6}$  gを超えることができなかった。自 然界におけるFe<sup>57</sup>の分布(鉄の総量の2.2%)を考慮すると,不純物として含まれる可 能性のある鉄の含有量は $\delta m_{Fe^{57}} \approx 2.5 \cdot 10^{-8}$  gを超えることはできなかった(表 4.1)。

変換実験においては、重水をベースとする培地に $\Delta m_0 \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ g}$ の安定同位体 $\text{Mn}^{55}$ , すなわち $N_0 = 1.8 \cdot 10^{18}$ 個の $\text{Mn}^{55}$ 原子に相当する量の $\text{Mn}\text{SO}_4$ が添加された。不純物の (化学元素としての)鉄の総量は $\Delta m_1 \approx 10^{-8} \text{ g}$ を超えなかった。

同位体Fe<sup>57</sup>の不純物含有量をコントロールするため,水-塩培地を作製する直前に, すべての乾燥成分(試薬)の分析をメスバウアーガンマ線分析計によって行った。

また,変換実験において微生物培養物を利用する直前に,その一部の事前分析をメ スバウアーガンマ線分析計によって行った。

成分	濃度,%	Fe 含有率,%	Fe 含有量, g
ショ糖	3	10 <sup>-4</sup>	$3 \cdot 10^{-7}$
$(NH_4)_2$ -tartrate	1	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0.25	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-8}$
$CaHPO_4 \cdot 7H_2O$	0.008	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-8}$
K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.5	$5 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-7}$
MnSO <sub>4</sub> ・7H <sub>2</sub> O(変換実験で)	0.01	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-9}$
純水(変換実験ではD <sub>2</sub> 0, 対照	100	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>
実験ではH <sub>2</sub> 0)	(10 mL)		

#### 表4.1. 培地の組成

すべての場合において、不純物同位体Fe<sup>57</sup>の含有量はメスバウアーガンマ線分析計 の記録レベル(感度レベル)を下回っていた。これは用いられる試薬に関するデータ シートのデータと一致していた。

増殖中の微生物培養物中における同位体核変換に関する典型的な実験シリーズは, いくつかの(原則として4個の)キュベット中で同一の培養物を同時に育成するやり 方で行われた(図 4.1)。

1番目と2番目のキュベットには,基礎成分(変化しない成分),すなわち軽水( $H_2O$ ) をベースとする糖-塩培地で, $MnSO_4$ 塩が添加されていないもの(1番目)と添加され たもの(2番目)が入れられていた。3番目のキュベット中の培地は,それと同じ組成 の培地基礎成分を持ち,重水( $D_2O$ )をベースとし, $MnSO_4$ 塩が添加されていないもの によって作製された。最後の4番目のキュベットには,培養物の増殖に必要とされる すべての培地基礎成分,変換に必要とされる $MnSO_4$ 塩および重水( $D_2O$ )をベースとす る培地が入れられていた。

培養物の増殖に必要とされる培地の上記の組成から,変換に必要とされる同位体成 分は唯一(同位体と元素の成分の点で最適化された)4番目のキュベットにのみ入れ られていたことが分かる。

相異なる組み合わせを持つ培地成分のこのような作製方法が,同位体Fe<sup>57</sup>の不純物 が実験結果に与える可能性のある影響を排除することを可能にした。

特に、もし鉄同位体Fe<sup>57</sup>が不純物として軽水または重水中、あるいは基礎成分の組成中に存在し、さらにはキュベットのガラスの組成中や空気中に含まれていたとすれば、その同位体は培養物の増殖過程において抽出され、培養物の育成後にすべてのキュベットにおいて記録されたはずである(これにはキュベット *1~3*における実験も含まれる)。もし同位体Fe<sup>57</sup>が重水中にのみ存在していたとすれば、それはキュベット *3*と4で増殖した培養物において記録されたはずである。もし同位体Fe<sup>57</sup>がMnSO<sub>4</sub>塩中に存在していたとすれば、それはキュベット *2*と4で増殖した培養物において検出されたはずである。

メスバウアー分析は、記録可能な量の同位体Fe<sup>57</sup>は、キュベット 4 で育成された培養物においてのみ、すなわち、常温核融合に必要とされるすべての条件が揃っている場合にのみ存在していることを示した。



図 4.1. 増殖中の微生物培養物中における同位体核変換現象の研究に関する「交差」 実験のスキーム

このような複数の実験シリーズが、相異なる培養物、相異なる育成時間(24 時間, 48 時間および 72 時間)、相異なる増殖モードについて行われた。重水をベースとする 培地において培養物を増殖させるためには、増殖期間全体を通じて培地の連続撹拌を 適用することが必須であることが明らかになった。すべての培養物は恒温器中におい て最適温度 32℃で育成された。

各実験シリーズの終了後,得られた生物学的実体を遠心分離機を用いて培地から分離し,蒸留軽水(H<sub>2</sub>0)で入念に洗浄してから乾燥させた。乾燥後の薄い皮膜状の生物学的実体を鉄を含有していないガラス製器具を用いて剥ぎ取り,粉砕して粉末にし, その一部をメスバウアー分析計に入れた(乾燥後の培養物の他の一部は,レーザー飛行時間型質量分析計を用いた独立した研究のために利用された)。

メスバウアーガンマ線分析計における共鳴吸収の確率を増大させるため、一部の実 験では乾燥後の培養物の一部を液体窒素の温度(T=78 K)まで冷却した。

ガンマ線分析計におけるメスバウアー放射源としては、クロムマトリックス中の放射能 30~40 mCi の同位体Co<sup>57</sup>を利用した。この放射源はエネルギー14.4 KeV を持つガンマ線の自然幅の単一の(分裂していない)スペクトル線を与えた。

ガンマ線分析計の感度を向上させるため、メスバウアーガンマ線放射転換型検出器 を利用した。このことが融合される同位体Fe<sup>57</sup>の記録精度を従来型(非転換型)ガン マ線検出器と比べてα≈9倍に増大させることを可能にした(αはFe<sup>57</sup>原子核中におけ るメスバウアーガンマ遷移に関する内部電子遷移率である)。

ガンマ線分析計の 256 のチャネルのそれぞれにおける測定過程は、ガンマ線共鳴線から遠く離れた所の分析計チャネルにおけるカウント数 $N_{\infty} = 3.5 \cdot 10^6$ が得られるまで行った。このような統計手法が所要の相対的測定精度 $\langle \Delta N \rangle / \langle N \rangle \approx 5 \cdot 10^{-4} = 0.05\%$ を保障した。

キュベット 4 の最適培地、すなわち変換過程にとって必要とされる成分 ( $D_2O$ と  $MnSO_2$ ) を含有する培地で $\Delta t = 72$  hの間育成された *Saccharomyces cerevisiae T-8* 培養 物のメスバウアースペクトルを図 4.2.a に示す。メスバウアー同位体 $Fe^{57}$ の存在が明確 に記録されていることが分かる。各実験における育成後の培養物の総質量は 0.3~0.5 g であった。



図 4.2. 育成後の培養物 *Saccharomyces cerevisiae T-8*のメスバウアースペクトル: a-Mn<sup>55</sup>が存在するD<sub>2</sub>O培地; b-Mn<sup>55</sup>が存在するH<sub>2</sub>O培地; c-Mn<sup>55</sup>が存在しない D<sub>2</sub>O培地

図 4.2.b のスペクトルは, 軽水をベースとし, MnSO<sub>2</sub>塩が存在する培地が入れられて いるキュベット 2 で育成されたそれと同じ *Saccharomyces cerevisiae T-8* 培養物のもの であり, 図 4.2.c のスペクトルは, キュベット 3 (重水D<sub>2</sub>Oをベースとし, MnSO<sub>2</sub>塩が 添加されていない培地) で育成されたそれと同じ培養物のものである。

これらのスペクトルから,非最適培地で育成された培養物中における同位体Fe<sup>57</sup>の 量はバックグラウンド値と一致しており,記録レベル以下にあるという結論が導き出 される。

同位体 $Fe^{57}$ におけるメスバウアー共鳴の自然幅は(速度単位で) $\Gamma = 0.19 \text{ mm/s}$ である。

最適条件で育成された培養物に関する図 4.2.a のスペクトルにおいては、ガンマ線のスペクトル線は自然幅 $\Gamma$ に対して $p_a = \Delta \omega_a / \Gamma \approx 10$ 倍だけ広がっていた。そのような線幅広がりの本性は、検討されている同位体 $Fe^{57}$ の核四極子モーメントと、乾燥され、粉末状態になるまで粉砕された培養物の静電場の勾配との相互作用と関係している。

ローレンツ型線幅広がりの場合におけるメスバウアー共鳴同位体Fe<sup>57</sup>を含有する鉄 原子の総数は、薄いメスバウアー吸収体に関して得られた次の公式に従って計算され た。

 $N_{\rm a} = \eta_{\rm a} S(1+p) / \sigma_0 f$ 

ここで $\eta_a = (N_{\alpha} - N_0)/N_0$ は吸収共鳴の相対深さ;  $N_{\alpha} \geq N_0$ は共鳴から遠く離れた所と ガンマ線分析計チャネルにおけるカウント数;  $S \approx 0.63 \text{ cm}^2$ は乾燥後の被験培養物が 充填されているガンマ線分析計の窓の面積;  $f \approx 0.6$ は被験培養物からなる吸収体中 におけるメスバウアー効果の確率;  $\sigma_0$ は同位体Fe<sup>57</sup>中における共鳴吸収断面積である。

吸収共鳴の相対深さ,融合される同位体Fe<sup>57</sup>の全原子数およびそれらの原子質量の総計値は次のとおりである。

 $\eta_{\rm a} = (1.9 \pm 0.53) \cdot 10^{-3}$ 

 $N_{\rm a} = (0.87 \pm 0.24) \cdot 10^{16}$ 

 $m_{\rm a} = (1 \pm 0.28) \cdot 10^{-6} \, {\rm g}$ 

記録される常温融合反応に対応する変換率は次のとおりである。

 $\lambda_{\rm a} = N_{\rm a}/N_0\Delta t = (1.9 \pm 0.52) \cdot 10^{-8}$ 

次元: 同位体Mn<sup>55</sup>の原子核1個当たりの1秒間に融合される同位体Fe<sup>57</sup>の原子核 数

最適条件下における他の培養物の増殖過程においても上記と同様の結果が得られた。

いくつかの場合(例えば *Deinococcus radiodurans M-1* 培養物の場合)においては, 育成後の培養物中における融合された同位体Fe<sup>57</sup>のメスバウアー吸収スペクトルの構 造はダブレットの形状を持っていた。その形状は乾燥後の生物学的実体の空間的構造 を変形した構造と一致していた。

様々な実験シリーズにおいて $MnSO_4$ 塩の存在下で重水 $D_2O$ をベースとする培地で育成された *Deinococcus radiodurans M-1*培養物のメスバウアーガンマ線分析計で得られた実験スペクトルを図 4.3 の a と b に示す。

同位体Fe<sup>57</sup>の融合された原子の総数は、この場合は次式によって決定された。

 $N_{\rm a} = 2\eta_{\rm a}S(1+p_{\rm a})/\sigma_0 f$ 

この微生物培養物の場合,吸収共鳴の相対深さ,融合される同位体Fe<sup>57</sup>の全原子数 およびそれらの原子質量の総計値は次のとおりである。

 $p_{a} \approx 3.4$   $\eta_{a} = (1.53 \pm 0.57) \cdot 10^{-3}$   $N_{a} = (0.59 \pm 0.21) \cdot 10^{16}$  $m_{a} = (0.67 \pm 0.24) \cdot 10^{-6} \text{ g}$ 

増殖中の Deinococcus radiodurans 培養物中におけるこれに対応する変換率は

 $\lambda_a = (1.3 \pm 0.46) \cdot 10^{-8}$ 

(同位体Mn<sup>55</sup>の原子核1個当たりの1秒間に融合される同位体Fe<sup>57</sup>の原子核数)である。

実験の実施の過程では、存在する可能性のある人為的要因に関する念入りな検証が 行われた。

人為的要因の仮説上の発生源の1つは、培地の組成がFe<sup>57</sup>不純物の生物学的利用率 に与える可能性のある影響と関係していた。培養物の増殖過程への各種鉄同位体の関 与の特性に関する予備的研究が存在しなかったこととの関連から、この問題をより入 念に検証する必要があった。例えば、同位体Fe<sup>57</sup>はD<sub>2</sub>0の存在下では増殖中の培養物に



**図 4.3.** 育成後の培養物 *Deinococcus radiodurans*のメスバウアースペクトル: a と b-Mn<sup>55</sup>が存在するD<sub>2</sub>0培地; c-Mn<sup>55</sup>と少量の同位体Fe<sup>57</sup>が存在するD<sub>2</sub>0培地

よって利用されるが、H<sub>2</sub>Oをベースとする培地では利用されないという仮説は真っ当な仮説である。D<sub>2</sub>Oをベースとする培地で育成された培養物中とH<sub>2</sub>Oをベースとする 培地で育成された培養物中とでは、Fe<sup>57</sup>のガンマ線吸収スペクトルの構造が異なると いう仮説に関連したそれとは別の予想も立てることができる(例えば、H<sub>2</sub>Oと MnSO<sub>4</sub> を含有する培養物に対しては、スペクトルの各成分の振幅が実験では記録不可能なレ ベルまで相応に低下している他成分超微細構造が対応しているのに対して、D<sub>2</sub>Oを含 有する培養物においては、そのような分裂は存在しない)。

そのような効果が存在する可能性とその根拠を検証するため、我々は育成後におけ る各種の培養物のガンマ線スペクトルに関する研究を行った。それらの培養物には、 増殖過程において非最適培地(H<sub>2</sub>Oと MnSO<sub>4</sub>を含有する培地)の組成にコントロール された少量の同位体Fe<sup>57</sup>が添加された場合における培養物も含まれていた。非最適培 地で育成された *Deinococcus radiodurans M-1* 培養物による原子核Fe<sup>57</sup>の吸収が促進さ れた、この場合におけるガンマ線スペクトルの形状(図 4.3.c)は、最適培地(D<sub>2</sub>Oと MnSO<sub>4</sub>を含有する培地)中での変換に関する実験におけるガンマ線スペクトル(図 4.2 の a と b)と完全に類似していた。このことは、人為的要因のその仮説上の発生源は 重要性を持たないことを示している。 したがって、この変換実験における同位体Fe<sup>57</sup>に対応する吸収共鳴の発現は、超微 細構造の変化とも、またガンマ線共鳴吸収のスペクトル線の個別成分のスペクトル変 化とも無関係であり、変換反応において同位体Fe<sup>57</sup>が融合されていることの確実な証 拠となっている。

以上の実験結果をまとめると、次の一連の結論を下すことができる。

1. 培地の成分中には,顕著な量の同位体Fe<sup>57</sup>は存在しない。

2. 同位体Fe<sup>57</sup>は重水中には存在せず,また,微生物培養物の増殖過程においてガラ スや空気から抽出されていない。

3. 軽水をベースとする培地と重水をベースとする培地で育成された培養物中における同位体Fe<sup>57</sup>のガンマ線吸収スペクトルの構造は一致している。

このように、最適培地での微生物培養物の増殖終了後に検出される同位体Fe<sup>57</sup>は、 人為的要因とは無関係であり、それらの培養物の増殖過程において、常温核変換反応

 $Mn^{55} + d^2 = Fe^{57}$ 

の結果として形成される。

最後に、ここで検討されている反応から生じる熱力学的結果について検討しよう。 融合反応Mn<sup>55</sup> + d<sup>2</sup> = Fe<sup>57</sup>はエネルギー的に有利な反応であり、エネルギーの放出 を伴って進行するはずであるから、最適組成の培地が入っているキュベット中で放出 される可能性のあるエネルギーの平均強度(*P*<sub>a</sub>)は、反応に関与する原子核の質量欠損 の収支から出発して計算することができる。すなわち、

 $\langle P_{\rm a} \rangle \approx N_{\rm a} [\mathrm{M}(\mathrm{Mn}^{55}) + \mathrm{M}(\mathrm{d}^2) - \mathrm{M}(\mathrm{Fe}^{57})]c^2/\Delta t$ 

ここでM(Mn<sup>55</sup>), M(d<sup>2</sup>)およびM(Fe<sup>57</sup>)はMn<sup>55</sup>, d<sup>2</sup>およびFe<sup>57</sup>の質量である。 変換反応に関与する同位体の質量欠損の差は次のとおりである。

 $\Delta Mc^2 = [M(Mn^{55}) + M(d^2) - M(Fe^{57})]c^2 = 15.605 \text{ MeV}$ 

実験データから計算された値を用いると,  $N_a \approx (0.9 \sim 0.6) \cdot 10^{16}$ ,  $\Delta t \approx 3 \cdot 10^5$  sの場合, 容積 $V = 10 \text{ cm}^3$ のキュベット中での変換過程で放出されるエネルギーの平均強度は  $\langle P_a \rangle \approx 75 \sim 40 \text{ mW}$ を上回らない。

反応産物の間におけるそのエネルギーの分布に関する特殊な問題は脇に置いて考え ると、エネルギーが完全に熱に変換されるという条件に従った場合でさえ、(特に、育 成過程が自動温度調節式の恒温器中で行われたことを考慮すると)その強度は培養物 の増殖の熱的モードを本質的に変えることはできなかったことを指摘しよう。

### 4.2.2.レーザー飛行時間型質量分析計を用いた増殖中の微生物培養物中における軽同 位体と中間質量同位体の制御変換に関する研究

既に指摘したように、実験結果の最大限の確実性の確保が同位体変換実験に対する 最も重要な要件の1つとなっている。この目標は、同一の対象物に対して複数の互い に独立した研究方法を利用した場合にのみ達成することができる。

我々は,変換反応Mn<sup>55</sup> + d<sup>2</sup> = Fe<sup>57</sup>にとって最適化された培地で育成された後,メス バウアーガンマ線分析計で分析された培養物の質量スペクトルについて,それとは別 の方法による研究を行った。

その研究は、分析対象物に焦点を定めた単発レーザーフラッシュ法による固体材料



図4.4. レーザー飛行時間型質量分析計の原理図

のミクロ局所分析を用途とするレーザー飛行時間型質量分析計を用いて行われた。実 験結果の最大限の確実性という同じ要件から出発して,実験で用いられるこの装置の 動作特性をより詳しく検討しよう。

装置の原理図を図 4.4 に示す。低温プラズマの形成には、パルスエネルギーW = 0.2 J、時間幅 $\tau = 40 \text{ ns}$ のルビーパルスレーザー1(照射波長 $\lambda = 0.69 \mu \text{m}$ )が用いられた。

レーザーの焦点の直径 $D = 100 \mu m$ が,被験試料 2の表面上において温度 $kT \approx 100 eV$ のレーザープラズマの形成を保障した。相矛盾する 2 つの要件——(分子プラズマではなく)確実に純粋な原子プラズマを得るためには温度を上昇させなければならないという要件と,確実に 1 段階の電離を得るためには温度を低下させなければならないという要件——から出発すると,この温度が最適温度である。

各レーザーパルスの作用により,被験試料の表面において直径100 μm,深さ約1 μm のゾーンから試料の原子の放出が生じた。プラズマの(分子結合を特徴づける大きさ のスケールにおいて)+分高い温度の結果,被験物質中におけるすべての分子結合の 完全な解離と1価イオン(約95%)と2価イオン(約4%)の形成が生じた。それら のイオンはレーザーの焦点から自由に飛散した。

相異なる同位体のイオンパケットの分離は、イオンの熱スペクトル全体の中から所 与の大きさ $W_0 \approx 100 \text{ eV}$ の近傍のエネルギーを持つスペクトルのみを抽出するエネル ギーディスクリミネーター3 を通過した後に生じる。イオンパケットの記録は、飛行 選別(その選別はアナライザーセクション 5においてエネルギー $W_0$ を一定として速度 差 $v_i = (2W_0/m_i)^{1/2}$ にもとづいて行なわれる)を通過した後に、相異なる元素と同位体 別に行われる。最良の観測条件は、濃度の小さい同位体成分に対応している。

この飛行時間型質量分析法は、(次節の表 4.2 に示されているように) 個別成分の相 対濃度測定チャネルおよび各イオンクラスターの空間的・時間的モジュレーション周 期分析チャネルにより、資料の化学組成と同位体組成を同時に相互に独立して分析す ることを可能にする。

装置の分析性能を改善するため、平面ミラー磁場においてイオンを位相集束するイオン光学系 4 が適用された。アナライザーの出口スリットに対するイオン光学系の位置関係、またサイズ約 100 cm のドリフト領域を持つアナライザー5 から出るイオンパケットの流出角の選択が、電子式乗算器 6 の入口スリットの近傍においてイオンパケットを空間的・時間的に集束することを可能にした。このイオン光学的集束装置の適用が、検出元素の相対感度を従来のまま保ちつつ、装置の分解能を*R* = *m*<sub>1</sub>/(*m*<sub>2</sub> –

*m*<sub>1</sub>) = 600まで上昇させた。

処理された電子信号は記憶装置付きデュアルビームオシログラフ 7の入口に送られ,次に写真フィルムに記録されるか,またはコンピューターの情報処理・蓄積システムに送られた。

質量数A = 54~57の領域(すなわち,反応に関与する同位体が存在している領域) における質量スペクトルの測定結果を図 4.5 に示す(Vysotskii, 2000, 2001)。

図 4.5 の a と b には多同位体天然鉄と単同位体天然マンガンの対照スペクトルが示されている。図 4.5.c には重水D<sub>2</sub>Oをベースとし、同位体Mn<sup>55</sup>(MnSO<sub>4</sub>塩)が添加されていない培地で育成された *Saccharomyces cerevisiae* 培養物を用いた対照実験の試料の質量スペクトルが示されている。図 4.5.d には重水D<sub>2</sub>Oをベースとし、同位体Mn<sup>55</sup>(MnSO<sub>4</sub>塩)が添加されている培地で育成されたそれと同じ培養物の質量スペクトル



図 4.5. レーザー飛行時間型質量分析計を用いたメスバウアー同位体Fe<sup>57</sup>の合成過程の研究

が示されている。このスペクトルは,事実上,融合された同位体Fe<sup>57</sup>のスペクトルと 不純物の天然鉄同位体 (Fe<sup>54</sup>, Fe<sup>55</sup>およびFe<sup>57</sup>)のスペクトルを足し合わせた結果とな っている。

測定結果から分かるように、同位体Fe<sup>57</sup>とFe<sup>56</sup>の濃度比が対照実験(図 4.4.c)と天 然鉄(図 4.4.a)の両方においてその自然値

 $\eta({\rm Fe}^{57})/\eta({\rm Fe}^{56}) \approx 0.02$ 

と一致していることは明らかである。

それとは逆に、最適組成の培地で増殖した培養物の組成中のそれらの同位体の濃度 比は自然値を 35~45 倍上回っている。

 $\eta(\text{Fe}^{57})/\eta(\text{Fe}^{56}) \approx 0.7 \sim 0.9$ 

すなわち,融合された同位体Fe<sup>57</sup>の割合は不純物同位体Fe<sup>56</sup>の割合より著しく高い。 このことから,融合された同位体Fe<sup>57</sup>の合計質量と原子数は次のようになる。

 $m(\text{Fe}^{57}) \approx [\eta(\text{Fe}^{57})/\eta(\text{Fe}^{56})]m(\text{Fe}^{56}) \approx (0.8 \sim 1) \cdot 10^{-6} \text{ g}$  $N(\text{Fe}^{57}) \approx (0.6 \sim 0.8) \cdot 10^{16}$ 

これに対応する(飛行時間型質量分析法によって得られた)変換率は

$$\lambda^{(\text{mass-spectr})} \approx N(\text{Fe}^{57})/N(\text{Mn}^{55})\Delta t \approx [\eta(\text{Fe}^{57})/\eta(\text{Fe}^{56})]N(\text{Fe}^{56})/N(\text{Mn}^{55})\Delta t \approx (1 \sim 1.3) \cdot 10^{-8}$$

(同位体Mn<sup>55</sup>の原子核1個当たりの1秒間に融合される同位体Fe<sup>57</sup>の原子核数)である。

メスバウアーガンマ線分析法と飛行時間型質量分析法によって得られた変換率の値 はほぼ一致していることが分かる。

## 4.3. 増殖中の培養物中における平均原子番号の同位体の制御変換の観測と質 量分光学的研究

#### 4.3.1.作業方法と研究方法

平均原子番号の同位体の常温核変換現象の観測と研究に関する実験は、コントロールされた量の単同位体化学元素Na<sup>23</sup>とP<sup>31</sup>が添加された最適化された鉄欠乏培地中に存在する増殖中の微生物培養物中における予想される融合反応

 $Na^{23} + P^{31} = Fe^{54}$ 

を基礎としていた。

この反応は正のエネルギー収率

 $\Delta E = [M(Na^{23}) + M(P^{31}) - M(Fe^{54})]c^2 = 22.4 \text{ MeV}$ 

を特徴としており、したがって任意の同位体相互作用エネルギーの場合(原子核の相 対運動エネルギーがゼロに近い場合を含む)において進行することができる。当然, この場合における主要な問題はクーロン障壁の克服と関係している。この問題は別の 章で検討される。

研究は Bacillus subtilis 細菌培養物をベースとして行なわれた(Vysotskii, 2000, 2001)。

変換反応の結果,天然鉄中における濃度が小さい( $\eta = 5.8\%$ )希少鉄同位体Fe<sup>54</sup>が 形成された。(希少なメスバウアー同位体Fe<sup>57</sup>の形成反応と同様に)この反応の疑う余 地のない利点は,反応の最終産物が安定的であり,天然鉄中には小さい濃度しか含ま れておらず,培養物の増殖時に培養物のバルク中に蓄積されるという点である。その 最終産物は質量分析法によって容易に検出することができる。

次の実験方法が用いられた。遠心分離処理,洗浄処理および成長促進処理を施する ことによって事前に得られた培養物を,Mg塩,Ca塩,K塩,Na塩,ショ糖および純粋 な軽水(H<sub>2</sub>O)100 mLを含有する糖-塩培地が入っているキュベットに入れた。培養 物恒温器中において増殖に最適な温度32℃で育成された。培地の組成を表4.2 に示す。

成分	濃度,%	鉄含有率,	鉄含有量,
		(以下),%	(以下), g
ショ糖	2	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
MgSO <sub>4</sub>	0.05	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
CaCO <sub>3</sub>	0.2	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$
KCl	0.05	$3 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$
NaNO <sub>3</sub>	0.5	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> (変換実験で)	0.2	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
純水(蒸留水)H <sub>2</sub> 0	100	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	(100 mL)		

表4.2. 培地の組成

実験の基本的な着想は、培養物を複数の種類の培地で育成し、それらのうち1つの 培地のみが融合反応に必要とされる同位体Na<sup>23</sup>とP<sup>31</sup>の両方を含有するようにすると いうことであった。

この目的により,変換実験では,他の成分とともにNaNO<sub>3</sub>塩を含有している培地に, さらに $K_2$ HPO<sub>4</sub>塩が添加された。

NaNO<sub>3</sub>塩中の同位体Na<sup>23</sup>の合計質量と全原子数は次のとおりであった。

 $m(\mathrm{Na}^{23}) \approx 0.13 \mathrm{g}$ 

 $N(Na^{23}) \approx 2.8 \cdot 10^{21}$  (EVAL)

この塩の不純物の鉄の含有量は $\Delta m_{\rm Fe} \approx 10^{-4} \, {\rm g}$ という小さい値を上回らなかった。同位体 ${\rm P}^{31}$ の質量と原子数は次のとおりであった。

 $m(\mathbf{P}^{31}) \approx 0.1 \,\mathrm{g}$ 

 $N(\mathbb{P}^{31})\approx 1.1\cdot 10^{21}$ 

培地のすべての乾燥成分は事前に質量分析計で分析された。育成される培養物に対しても同様の分析が行われた。その結果,不純物の鉄の含有量は小さく,試薬に関するデータシートの値とほぼ一致していることが確認された。

核変換に関する諸実験のうちの各実験の典型的なシリーズは、同一の培養物の分割 された各部分を、相異なる培地が入っている2つのキュベット中で互いに独立に育成 するというスキームで行われた(図4.6)。



図4.6. 微生物培養物中における同位体の核変換と分光分析に関する実験のスキーム

1 番目のキュベットにはK<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>を含有しない完全組成の(NaNO<sub>3</sub>を含む)水-塩培 地が入れられていた。2 番目のキュベットにはK<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>を含有するそれと同じ完全組成 の水-塩培地が入れられていた。相異なる実験シリーズにおける培養物の育成時間は 育成時間は 24 時間,48 時間および 72 時間であった。

質量スペクトル測定の典型的なシリーズには、遂次記録される質量スペクトルの分 析が含まれていた。すなわち、

a)純粋な天然鉄の質量スペクトルの測定(天然鉄の任意の同位体に関する実験作業 をする際の標準測定)

b) P<sup>31</sup>を含有しない(すなわちK<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>を含有しない) 完全組成の(<sup>23</sup>NaNO<sub>3</sub>を含む) 培地で増殖した乾燥後の対照培養物の質量スペクトルの分析

c) Na<sup>23</sup>とP<sup>31</sup>を含有する完全組成の培地で増殖した乾燥後の培養物の質量スペクト ルの分析

各種の分析対象物は、測定過程が開始され、真空が創出される直前にレーザー質量 分析計の同一の真空チャンバーに入れられた。すべての分析対象物は、高純度の鉛板 の表面上に設けられた、互いに離隔された開いた微小空洞に収容されていた。微小空 洞はレーザーパルスが作用する側が開いており、レーザーの焦点の直径を上回る直径 を持っている。質量分析計のアライメントシステムは、真空チャンバー内でその鉛板 を移動させ、各微小空洞をレーザーパルスの焦点と一致する点にセットすることがで きた。レーザーパルスが各試料に作用すると、温度約 100 eV の飛散するレーザープラ ズマの雲が形成された。その単一エネルギーイオンのプラズマから単一エネルギーイ オンが(狭いエネルギーウィンドウを持つエネルギーディスクリミネーターによって) 分離され、次に飛行選別が行われた後、プラズマイオンがその各質量に従って区分さ れた。処理された電子信号は検出器から記憶装置付きデュアルビームオシログラフ の入口に送られ、次に写真フィルムに記録されるか、またはコンピューターの情報処 理・蓄積システムに送られた。

最初に質量スペクトル全体の分析が行われ,次に具体的な同位体に対応するスペクトル領域のより詳細な分析が行われた。

測定結果の記録の信頼性,一目瞭然性,確実性が重要な意味を持っていた。最も一 目瞭然たる結果が得られたのは,デュアルビームオシログラフによる同位体質量ス ペクトルの写真記録においてであった。同位体分布の記録は測定シリーズの対ご とに遂次行われた。 測定シリーズの対のそれぞれには、まず最初に天然鉄同位体の標準スペクトル の取得が含まれていた。その標準スペクトルは、天然鉄が収容されている微小空洞 にレーザーパルスを作用させることによって得られ、レーザーパルスと同期化さ れた、デュアルビームオシログラフのスクリーン上の上側走査線という形で記録 された。次に、被験培養物の試料が収容されている微小空洞をレーザーの焦点領域 内に移動させ、培養物の同位体のスペクトルを取得した。そのスペクトルは、天然 鉄の標準スペクトルに対応する上側走査線と完全に同期化された、デュアルビー ムオシログラフの同じスクリーン上の下側走査線という形で記録された。次に、得 られた質量スペクトルをオシログラフのスクリーンから写真に記録した。それと は独立して、それらと同じスペクトルをコンピューターに記録した。

#### 4.3.2.結果と考察

実験結果を図 4.7 (コンピューター処理後) と図 4.8 (オシログラフのスクリーンからの写真) に示す。

写真(図 4.8)は記憶装置付きマルチビームオシログラフのスクリーンから撮ら れたもので、標準試料、対照試料および変換過程にかけられた試料の質量スペクト ルを描き出している。すべての写真において、上側走査線は天然鉄(標準実験)の スペクトルに対応しており、下側走査線は被験培養物(対照実験または変換実験) のスペクトルに対応している。

これらの写真からは、すべての被験培養物のスペクトルにおいて、天然鉄の当該 同位体のスペクトルから左側への(すなわち、より小さい質量の側への)、各種同 位体に対応するイオン流のピークの小さいシフトが存在していることを見て取る ことができる。このシフトは飛行時間型質量分析計の特殊性と関係しており、ま た、各種元素に対応するイオンパケットの分離とそれに続く運動の過程におけるイオ ンパケットの運動と相互作用(わずかな斥力)の特徴に起因している。イオンクラス ターの追加的なシフトに対して主な影響を及ぼしているのは、より軽い元素や同位体 のイオンを斥け、それらのイオンを運動軌道の方へ若干シフトさせ、検出器によるそ れらのより早い記録を引き起こす重い鉛同位体が、プラズマパケット中に存在しない という事情である。

これらの写真とグラフから、最適組成の培地で増殖した培養物の場合に希少同位体 Fe<sup>54</sup>の絶対濃度と相対濃度がきわめて著しく増大していることを明確に見て取ること ができる。その増大は自然値と比べた各種同位体の濃度比の変化と一致していた。す なわち、

 $\eta(Fe^{54})/\eta(Fe^{56}) \approx 0.06$ (標準実験における天然鉄と対照実験における希少な不純物の天然鉄の場合)

 $\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56}) \approx 0.2 \sim 0.25$  (最適培地での変換実験の場合)

これらの実験における好結果の繰り返し性は100%に近かった。

反応 $Na^{23} + P^{31} = Fe^{54}$ における複数の測定シリーズを平均した変換率は次のとおりであった。

 $\lambda_{\rm p} = N({\rm Fe}^{54})/N({\rm P}^{31})\Delta t = [\eta({\rm Fe}^{54})/\eta({\rm Fe}^{56})]N({\rm Fe}^{56})/N({\rm P}^{31})\Delta t \approx (3\sim 6) \cdot 10^{-10}$ 

(同位体P<sup>31</sup>の原子核1個当たりの1秒間に融合される同位体Fe<sup>54</sup>の原子核数)

 $\lambda_{\rm Na} = N({\rm Fe}^{54})/N({\rm Na}^{23})\Delta t = [\eta({\rm Fe}^{54})/\eta({\rm Fe}^{56})]N({\rm Fe}^{56})/N({\rm Na}^{23})\Delta t \approx (1 \sim 2) \cdot 10^{-10}$ 

(同位体Na<sup>23</sup>の原子核1個当たりの1秒間に融合される同位体Fe<sup>54</sup>の原子核数)



図 4.7. 鉄同位体の質量スペクトルの典型的なシリーズ: a-純粋な天然鉄に関する $標準試験; <math>b-変換試験(同位体P^{31} \ge Na^{23} を含有する培地で育成された培養物);$  $<math>c-対照試験(同位体P^{31} を含有しない培地で育成された培養物); t-標的から検出$  $器までの同位体イオンの飛行時間; <math>N_{M}$ -オシログラフのスクリーン上における信 号の振幅



図4.8.鉄同位体の領域の質量スペクトルに対応するオシログラフのスクリーンから 撮られた写真。上側-純粋な天然鉄に関する標準実験; 下側-育成後の微生物培養 物の質量スペクトル; a-対照試験(同位体P<sup>31</sup>を含有しない培地で育成された培養 物); bとc-変換試験(同位体P<sup>31</sup>とNa<sup>23</sup>を含有する培地で育成された培養物)

測定の確実性を高めるため、さらに糖-塩培地のすべての乾燥(初期)成分の質量スペクトル分析も行われた。

特に重要であったのは、培地の(融合反応への関与という点で)主要な成分である NaNO<sub>3</sub>塩とK<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>塩に対し、質量分析計においてレーザーパルスが与える直接的作用 の結果の解明であった。測定結果が示したところによれば、NaNO<sub>3</sub>とK<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>の単体試 料に対するレーザー照射の場合と、入念に調製されたそれらの塩の微細分散混合物に 対するレーザー照射の場合とにおいて同位体濃度比 $\eta$ (Fe<sup>54</sup>)/ $\eta$ (Fe<sup>56</sup>)  $\approx$  0.06に変化はな かった。

この結果は特別の意味を持っている。この結果は、NaNO<sub>3</sub>塩とK<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>塩が存在する 最適組成の培地での培養物増殖過程において、同位体Fe<sup>54</sup>の形成およびその形成過程 に起因する同位体比 $\eta$ (Fe<sup>54</sup>)/ $\eta$ (Fe<sup>56</sup>)の変化が実際に観測されている、すなわち、その 変化は常温核融合Na<sup>23</sup> + P<sup>31</sup> = Fe<sup>54</sup>の結果なのであって、質量分析計における照射試 料に対するレーザーパルスの熱作用とは無関係であるという結論を下すことを可能に する。このことは、観測される反応が、レーザーパルスの焦点における温度*kT* ≈ 100 eV での「熱」融合の結果ではなく、温度 32℃のときに増殖中の微生物培養物中において 進行していることを示している。

## 4.4. 増殖中の微生物培養物中における重同位体の変換の観測および変換過程 の制御方法に関する研究

#### 4.4.1.セシウムが増殖中の生物培養物中における中間質量同位体と重同位体の核変換 効率に及ぼす触媒的影響

本研究の目的は、同位体の原子核の相対運動エネルギーが低く、(生化学反応において)高い活性を持つ重元素が存在する場合における、それらの同位体の変換過程の解 明であった。そのような元素に当てはまるのは、何よりもまず、カリウムの生化学的 アナログであるセシウムである。

セシウムは必須微量元素には含まれていないが、それと同時に、カリウムとセシウムは生化学的に似通っており、多数の化学反応と生化学反応においてセシウムが首尾良くカリウムの代替物になることができることが良く知られている。類似元素および「生化学的代替物」に関する問題については第6章でより詳しく検討される。

我々の実験は、我々が以前に研究した糖-塩培地で増殖中の培養物中における変換 反応 $Na^{23} + P^{31} = Fe^{54}$ を、その増殖過程にセシウム塩を追加的に作用させることによ って最適化することを目標としていた。この反応は *Saccharomyces cerevisiae* 培養物 をベースとして行われた。

さらに、これらの実験では、セシウム同位体の変換 $Cs^{133} + p^1 = Ba^{134}$ と希少安定同 位体 $Ba^{134}$ の形成との同時進行する反応に関する研究も行われた。これは事実上、重元 素の生物学的変換に関して初めて成功裡に行われた研究である。

実験は微生物培養物に関する実験の伝統的なスキームに従い,温度 32℃で行われた。 対照実験では,洗浄処理と成長促進処理を施することによって事前に得られた培養 物を,Mg塩,Ca塩,K塩またはCs塩,Na塩,ブドウ糖および純粋な軽水(H<sub>2</sub>O)100 mLを含有する糖-塩培地が入っているキュベットに入れた(表 4.3)。同位体Na<sup>23</sup>とP<sup>31</sup> の核変換に関する標準実験(培地の組成については組み合わせ 1.1 と 1.2 を参照)で は,追加的な塩として同位体P<sup>31</sup>を含有するNa<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>が添加された。

触媒作用と核変換誘発(促進)に関する実験(表 4.3 の組み合わせ 2.1 と 2.2 を参照)では,標準的な KCl 塩の代わりに CsCl 塩が培地に添加された。KCl と CsCl は化学

的に類似しており、微生物培養物の増殖時にCs<sup>+</sup>イオンはK<sup>+</sup>イオンの代替物となることができる。

表4.3. 培地の組成

成分	濃度,%
常在成分	
ブドウ糖	2
NaNO <sub>3</sub>	0.5
MgSO <sub>4</sub>	0.05
純水(H <sub>2</sub> 0)	100
可変成分	
(1.) KCl	0.05
(1.1.) Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.1
(1.2.) Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.1
トリプトン	0.5
(2.) CsCl	0.05
(2.1.) Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.1
(2.2.) Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.1
トリプトン	0.5

増殖後の培養物中の同位体と元素の得られた全質量スペクトルを図 4.9 と表 4.4 に 示す。全質量スペクトルのうち鉄同位体の局在化領域が含まれている断片を拡大スケ ールで図 4.10 に示す。



**図 4.9**. 培養後の培養物 Saccharomyces cerevisiae の同位体と化学元素の全質量スペクトル
元素	組み合わせ					
	(1.1)	(1.2)	(2.1)	(2.2)		
Н	0.53	1.0	0.67	0.69		
С	23.4	32.1	19.3	18.1		
Ν	3.60	7.90	2.30	6.0		
0	21.0	21.3	18.3	25.0		
Na	4.80	3.30	5.80	4.40		
Mg	0.17	0.40	0.36	0.25		
Al	0.30	0.26	0.38	0.04		
Si	0.42	0.13	0.67	0.33		
Р	6.70	11.9	3.47	11.0		
S	3.83	7.90	2.22	5.50		
Cl	12.6	2.68	5.80	8.80		
K	18.6	10.8	13.5	17.0		
Са	0.77	0.62	_	_		
Fe	2.5	0.66	2.40	0.27		
F	0.03	_	_	0.03		
Ti	0.06	_	0.40	0.05		
Cu	0.11	_	0.04	0.11		
Zn	0.11	_	_	0.11		
Cr	0.30	_	0.04	_		
Cs	_	_	22.4	2.30		
Ва	_	_	1.90	< 0.01		
Mn	—	0.06	_	0.02		

表4.4. 微生物培養物中の同位体含有率

質量スペクトルは,飛行時間型分析計において被験培養物にレーザーパルスを1回 作用させる方法で得られた。

天然鉄同位体の場合の質量スペクトル(図 4.10.a~c)との比較が,得られた同位体(図 4.10.bの不純物の同位体Fe<sup>56</sup>とFe<sup>54</sup>および図 4.10.a,bの融合された鉄同位体Fe<sup>54</sup>)の正確な同定と定量的解釈を行うことを可能にした。

相異なる培地で増殖した培養物の質量分光分析から,次の結論を下すことができる。

1) リン酸塩欠如状態(組み合わせ1または2)で増殖した培養物の典型的な同位体 質量スペクトルを図4.10.cに示す。当然予想されたように、増殖後の培養物中の同位 体の濃度比 $\eta(Fe^{54})/\eta(Fe^{56}) \approx 0.06$ は天然鉄中における濃度比と同じであり、その鉄自 体は不純物に由来するものであった。

2) 培地中にセシウム塩 CsCl が欠如した状態に相当する組み合わせ 1.1 または 1.2 の 場合には、標準実験に関する実験結果は、反応Na<sup>23</sup> + P<sup>31</sup> = Fe<sup>5</sup>をベースとする変換に



Fe54

図 4.10.記録される鉄同位体の質量スペクトル: 上側の曲線-天然鉄をベースとす る標準実験; a-促進された変換(同位体P<sup>31</sup>, Na<sup>23</sup>およびCs<sup>133</sup>を含有する培地); **b**-自発変換(同位体P<sup>31</sup>, Na<sup>23</sup>およびK<sup>39</sup>を含有する培地); c-P<sup>31</sup>を含有しない培 地での対照実験

関する実験に関する既に検討した課題(第 4.3.1 節および第 4.3.2 節)におけるのと同 じであった。この場合、培養後の培養物の質量スペクトル中には、培地に含有されて いるすべての化学元素(カリウムを含む)が存在していたが、セシウムは存在してい なかった。鉄同位体の局在化領域に対応する質量スペクトルの部分を図 4.10.b に示す。 この場合、同位体Fe<sup>54</sup>とFe<sup>56</sup>の濃度比は $\eta$ (Fe<sup>54</sup>)/ $\eta$ (Fe<sup>56</sup>)  $\approx 0.2 \sim 0.4$ であった。

3) カリウムの化学的に類似したセシウムによる代替(KCl 塩の CsCl 塩による代替) に対応する組み合わせ 2.1 または 2.2 においては、増殖後の培養物中におけるセシウ ム濃度の急激な増大が記録されている。セシウム塩 CsCl は普通の水(軽水)をベース とする培地に完全に溶解可能であるから、増殖後の培養物の組成へのセシウムの入り 込みは、原子-分子レベルにおいて、大きくない不溶性クラスターの内部で生じている。 これは予想可能なかなり瑣末な結果である。

瑣末ではない、予想もしなかった結果は、そのような代替がナトリウムとリン酸塩 の鉄への変換の確率と最終的効率に及ぼす影響であった。

図 4.10.a から、培地の組成中におけるセシウムの存在は変換過程に対する促進的な 役割を示し、同位体濃度比を 1.5~2 倍以上、すなわちη(Fe<sup>54</sup>)/η(Fe<sup>56</sup>)≈ 1.0~1.5に増大 させるという結論が導き出される。

そのような制御(促進)された過程の場合に相当する変換率は次のとおりである。

 $\lambda \approx N(Fe^{54})/N(P^{31} + Na^{23})\Delta t \approx 10^{-9}$ 

(同位体P<sup>31</sup>とNa<sup>23</sup>の原子核1対当たりの1秒間に融合される同位体Fe<sup>54</sup>の原子核数) 培地の乾燥成分について事前に行われた対照測定は,全質量スペクトルで観測され る鉄同位体の振幅の小さいスペクトル線は,天然鉄と同じ同位体比η(Fe<sup>54</sup>)/η(Fe<sup>56</sup>) ≈ 0.06によって特徴づけられることを示した。このことは,「余剰」同位体Fe<sup>54</sup>は変換過 程においてのみ形成されることが可能であったことを裏づけている。

セシウムが鉄の融合に及ぼす促進作用のメカニズムに関する問題は未解決のまま残 されている。セシウムは必須元素としての鉄の融合反応には関与していないが(その 融合反応のためにはリン酸塩とナトリウムが存在すればそれで十分である),しかし, その過程に対して媒介的なきわめて本質的な影響を与えている。融合の最適化という 事実を,セシウムの存在が培養物のより活発な増殖を直接的に促進するという単純な 予想によって説明することもうまくいかない。カリウムがセシウムによって代替され たとき,微生物培養物の増殖の加速は観測されないからである。そのような促進のあ り得る説明は,セシウムは培養物の増殖に対して単純ではない仕方で影響を及ぼす, すなわち,増殖の時間的なダイナミクスのうちの,(我々の予想によれば)融合過程に 対するクーロン障壁の作用の短時間の干渉的除去に影響するような部分に対して影響 を及ぼすという予想である。この問題は第5章でより詳しく検討される。

#### 4.4.2. 増殖中の生物培養物中における重同位体の変換の検出

ナトリウムとリン酸塩の鉄への変換過程のセシウムによる促進の解明を目的とした 実験が行われた際,それと同時に,バリウムの希少同位体Ba<sup>134</sup>(他の同位体の中での その自然濃度は 2.4%を上回らない)の形成を伴うセシウムの変換反応Cs<sup>133</sup> + p<sup>1</sup> = Ba<sup>134</sup>に関する検討も行われた。この反応が行われる前提は,培地の組成の組み合わせ 2.1 (表 4.3)に対応していた。そのような変換反応は融合反応に相当し,鉄より重い 同位体の形成をもたらすにもかかわらず,この反応はエネルギー的に有利な反応であ り,エネルギーの放出

#### $\Delta E = [M(Cs^{133}) + M(p^{1}) - M(Ba^{134})]c^{2} = 8.3 \text{ Mev}$

を特徴としている。

記憶装置付きマルチビームオシログラフのスクリーンから撮られた写真(図 4.11)には、セシウムのバリウムへの変換反応の進行にとって最適な培地で増殖し た培養物の質量分析の結果が示されている。ベンチマーク(標準化学元素)として はバリウムが用いられた。図 4.11の上の写真にはバリウムの主要安定同位体の質 量スペクトルが示されている。主な最大値は同位体Ba<sup>138</sup>(自然含有率 71.7%)と一 致している。それだけでなく、質量スペクトルには、より希少なバリウム同位体Ba<sup>134</sup> (自然含有率 2.4%)、Ba<sup>135</sup>(6.6%)、Ba<sup>136</sup>(7.9%)、Ba<sup>137</sup>(11.2%)に帰属する最大

値も存在している。それらはバリウムの主要同位体より左側に位置している。

図 4.11 の下の写真において,上側の曲線は同位体の同定のためのベンチマーク として用いられているバリウムの質量スペクトルを示している。下側の曲線は最 適組成の培地(すなわち,モノアイソトピック元素であるセシウムCs<sup>133</sup>と水に含ま れている陽子p<sup>1</sup>が存在している培地)で増殖した乾燥後の培養物の全質量スペクトル



**図** 4.11. 天然バリウムの質量スペクトル(上側の曲線-主要同位体Ba<sup>138</sup>とより希少 な同位体Ba<sup>134</sup>, Ba<sup>135</sup>, Ba<sup>136</sup>, Ba<sup>137</sup>が存在している)とCs<sup>133</sup>の存在下で増殖後の培養物 中における合成された同位体Ba<sup>134</sup>の質量スペクトル

の断片を示している。この質量スペクトルには、培地中に存在し、培養物によって吸 収された同位体 $Cs^{133}$ と、融合反応 $Cs^{133} + p^1 = Ba^{134}$ の結果形成された同位体 $Ba^{134}$ が 存在していることが分かる。

質量スペクトルのわずかな変形(同位体Cs<sup>133</sup>のピークが左側, すなわちより軽い質量の方向にシフトし,同位体Ba<sup>134</sup>のピークが右側, すなわちより重い質量の方向にシフトしていること)は,前述した各種同位体の現実のイオンクラスターが飛行時間型分析計の長い真空管路内を運動するときにおけるイオンクラスター同士の相互作用(相互斥力)の特徴に起因している。

 $Cs^{133}$ と $Ba^{134}$ に対応するピークがほぼ等しいということから、セシウムとバリウムの変換率はきわめて高いという結論が導き出される。その変換率は $\lambda \approx 10^{-8}$ である(同位体 $Cs^{133}$ の原子核1個当たりの1秒間に融合される同位体 $Ba^{134}$ の原子核数)。

# 4.4.3.Sr, Cl および S が生物培養物中における変換過程の効率に及ぼす複合作用の 解明

常温融合の偶然的な(しばしば予見不可能な)性格は,常温融合を「正常な」(高温) 融合とは異なるものにしている主要な特性の1つであり,常温融合が科学界によって 認められることを妨げている主要な障害の1つをなしていることは良く知られている。 この事情が,そのような過程の制御方法の開発を促している。

変換過程が進行する培地中のカリウムのセシウムによる代替に関する予想外の実験

41 第4章 同位体と化学元素の転換に関する実験的研究

結果が得られた後に、微生物学の研究慣行から当然導き出されるように、それ自体としては培養物の増殖に対して促進作用または抑制作用のみを与える元素(Sr, Cl および S) が融合過程に及ぼす影響を解明することは論理的なことであった。

我々は、それらの元素が増殖中の微生物培養物中における変換反応 $Na^{23} + P^{31} = Fe^{54}$ の効率に及ぼす影響の解明をテーマとする一連の研究を行った。それらの元素の うちのどの元素もそれ自体としては核反応に直接的には関与しないが、それらは培養 物の増殖過程に対して相異なった仕方で作用を及ぼす。すなわち、Cl は増殖過程に対 して最も大きな抑制作用を及ぼす。S もやはり増殖過程に対して抑制的に作用するが、 しかし通常、その度合いは Cl よりはるかに弱く、培地中におけるその酢酸塩 $CH_3COO$ -の存在は、通常、任意の条件下において増殖過程の促進をもたらす。

研究は *Azotobacter chroococcum* 細菌培養物をベースとして行われた。各シリーズの実験は次の特徴を持っていた。

増殖過程は、伝統的成分および不変成分(KCl, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, NaNO<sub>3</sub>, 純粋なブドウ糖, 純粋な軽水H<sub>2</sub>O)と課題の全般的設定に応じた可変成分とを含有する培地で進行した。

特に、何よりもまず、CaCl<sub>2</sub>とSrCl<sub>2</sub>を用いた基本的な必須微量元素の代替(Ca⇔Sr) が行われた。生化学の実際的経験から良く知られているように、カルシウムイオンと ストロンチウムイオンは化学的に類似しており、互いに代替し合うことができる。

代替実験の第2群は、必須元素ではない被験化学元素(ClとS)に関するものであった。より大きな効率と解釈の一義性を確保するため、これらの元素は培養物の増殖にとって必須の微量元素である同一の化学元素(マグネシウム)の相異なる可溶性塩(MgCl<sub>2</sub>  $\Leftrightarrow$  MgSO<sub>4</sub>  $\Leftrightarrow$  Mg(CH<sub>3</sub>COO)<sub>3</sub>)の形で培地の組成に添加された。

培地の組成を表 4.5 に示す。

成分	濃度, %		
ブドウ糖	2		
NaNO <sub>3</sub>	0.5		
KCl	0.05		
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.15		
MnSO <sub>4</sub>	0.01		
純粋な蒸留水H20	100		
変換用の可変成分			
(1.) KCl <sub>2</sub>	0.5		
(1.1.) MgSO <sub>4</sub>	0.05		
(1.2.) MgCl <sub>2</sub>	0.04		
(1.3.) $Mg(CH_3COO)_3$	0.11		
(2.) $SrCl_2$	0.5		
(2.1.) MgSO <sub>4</sub>	0.05		
(2.2.) MgCl <sub>2</sub>	0.04		
(2.3.) $Mg(CH_3COO)_3$	0.11		

表 4.5. 培地の組成

42 第4章 同位体と化学元素の転換に関する実験的研究

用いられるすべての塩は液体培地への高い溶解性を持っている。それらの塩は、水 に溶解される前に質量分析計で鉄含有率が分析された。培養物の育成の温度と時間は 微生物実験にとって典型的なものであった(32℃で24時間,48時間および72時間)。 培養物の質量は増殖の過程で4~5倍に増大した。

実験の各シリーズにおいて、次の測定が行われた。

a) 育成後の培養物のすべての元素(水素からウランまで)の全質量スペクトルの取得(それらの測定結果と培養物中に存在する元素の濃度を図 4.12 と表 4.6 に示す)。

b)鉄のすべての同位体の標準質量スペクトルの取得(図 4.13 の上側の曲線,図 4.14.a~c)。

c)変換用に調整された培地で育成された培養物の組成中の同位体の質量スペクトルの分析(組み合わせ1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 2.3)。

すべての元素に関して得られた全質量スペクトルから,ストロンチウムは育成され た微生物培養物によるきわめて良好な生物学的利用率を持っているという結論が導き 出される。



図 4.12. 培地中にストロンチウムが存在するときの育成後の培養物の全質 量スペクトル



図 4.13.記録される鉄同位体の平均的質量スペクトル: a-天然鉄のスペクトル; b~d-組み合わせ 1.1~2.3 の培地で育成された培養物のスペクトル

元素 —	組み合わせ						
	1.1	2.1	1.2	2.2	1.3	2.3	
Н	0.49	0.74	1.44	0.33	0.14	0.58	
С	15.0	12.6	31.3	29.3	14.0	11.3	
Ν	5.8	3.8	6.8	1.10	1.63	3.13	
0	14.0	11.8	31.3	29.3	13.1	23.4	
Na	13.0	5.4	25.8	16.4	1.68	0.46	
Mg	0.35	0.5	0.85	0.35	1.0	1.06	
Al	0.15	0.16	0.31	0.66	0.15	0.53	
Р	18.0	17.2	1.1	11.6	27.1	41.2	
S	3.0	3.8	—	—	—	—	
Cl	7.5	16.5	0.4	1.98	1.0	1.3	
К	22.0	18.0	0.15	2.07	39.5	8.65	
Са	0.2	0.8	0.47	0.92	0.34	1.86	
Fe	0.1	0.16	< 0.01	< 0.01	0.13	0.23	
Sr	_	5.1	—	4.3	—	5.9	
Мо	_	0.26	_	0.38	—	0.18	

表4.6. 培養物中の同位体含有率

オシログラフのスクリーンから撮られた写真(図 4.14)は、培地の組成に対する各 種鉄同位体の質量スペクトルの形状の依存性に関するいくつかの典型的結果を示して いる。

得られたデータから、同位体Fe<sup>54</sup>の融合過程に対しては Sr の存在と(それより小さい度合いで) Cl の存在が影響を及ぼしている(すなわち,変換はMgSO<sub>4</sub>またはMg(CH<sub>3</sub>COO)<sub>3</sub>が存在する場合にのみ観測され,変換の促進はMg(CH<sub>3</sub>COO)<sub>3</sub>が存在する場合に観測される)という結論が導き出される。

この場合における濃度比は次のとおりである。

 $\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56}) \approx 0.2 \sim 0.4$  (組み合わせ 1.1 の場合)  $\eta(\text{Fe}^{54})/\eta(\text{Fe}^{56}) \approx 0.5 \sim 0.6$  (組み合わせ 1.3 の場合)

それ以外の場合には、質量スペクトル中に観測される鉄は存在しない、もしくはバ ックグラウンド値のレベルで記録されるか(組み合わせ 1.2, 2.2)、または天然鉄の同 位体比に相当している(組み合わせ 2.1, 2.3)。このことはその鉄が純粋に不純物に由 来するものであることを裏づけている。

得られた結果から,次の一般的結論が導き出される。培養物の増殖過程を部分的に 抑制する化学元素(Sr,ClおよびS)は、それらの培養物中における変換過程をより大 きな度合いで抑制する。

それと同時に、培養物の増殖を促進する元素およびそれらの塩の組み合わせ(この場合はMg(CH<sub>3</sub>COO)<sub>3</sub>)は融合速度をも増大させ、同位体の変換過程を最適化する。



**図**4.14. 記録される鉄同位体の質量スペクトル:上側の曲線-天然鉄のスペクトル; a<sub>1</sub>とa<sub>2</sub>-同位体P<sup>31</sup>とNa<sup>23</sup>および Mg(CH<sub>3</sub>COO)<sub>3</sub>塩が存在する培地1.3で増殖した培養 物の質量スペクトルの2つの互いに独立した例;b-同位体P<sup>31</sup>とNa<sup>23</sup>および MgCl<sub>2</sub>) 塩が存在する培地2.1で増殖した培養物; c-培地2で増殖した培養物

# 第5章 生物系における常温同位体変換過程の物理学的側面

#### 5.1. 荷電粒子の関与下における低エネルギーでの無閾値核融合反応の問題

相互作用する荷電原子核が低エネルギーのとき、クーロンポテンシャル障壁の存在 が核融合反応の実現に対する主な障壁となっていることは良く知られている。その反 応が実現するためには、相互作用する粒子が同時にある1つの場所(核力の作用半径  $R_n \approx 2 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$ の範囲内)に存在している必要がある。この場合、核反応断面積は原 子核の相互運動エネルギーに依存しており、「内部核断面積」

$$\sigma_0 = (S(E)/E) \tag{5.1}$$

と一致している。ここでS(E)はゆっくり変化するエネルギー関数である。この関数は、 非共鳴核反応の場合において、相互作用する粒子の相対エネルギーが小さいときは定 数 $S(E) = S_0$ である。例えば、dd 核融合非共鳴反応の場合、 $S_0 \approx 0.11 \text{ MeV} \cdot b$  [b t barn] である。

原子核の相互対向運動の運動エネルギー $E \approx eV$ 単位で表すことにすると、純粋な (自分自身の電子による原子核の電荷の遮蔽を考慮に入れない)クーロン相互作用の 場合、クーロンポテンシャル障壁 $V(r) = Z_1 Z_2 e^2 / r$ の存在は、古典的アプローチに従え ば原子核間の最小距離は制限されており、公式

$$r_{\min} = Z_1 Z_2 e^2 / E \approx 14 / E(eV) \cdot \text{\AA}$$
(5.2)

によって決定されるという結論に導く。

原子核の運動エネルギーが低い (熱エネルギー $E \approx 0.025 \text{ eV}$ に相当するレベルの) とき,核同士は巨視的な距離

$$r_{\min} \approx 640 Z_1 Z_2 \text{ Å} \tag{5.3}$$

までしか近づき合うことができないことが分かる。

電子による遮蔽の存在は、相互作用エネルギーのより急速な減少、すなわち指数関数的な減少 $V(r) = (Z_1 Z_2 e^2/r) \exp(-r/a)$ をもたらす。このことは、低エネルギー粒子が遮蔽半径とほぼ等しい距離 $r_{\min} \approx a$ まで近づき合うことを可能にする。例えば、重水素分子 $D_2$ 中における重水素間の平衡距離は室温(kT = 0.025 eV)のとき0.74Åとなる。電子による遮蔽が存在しないときにそれと同様な原子核同士の接近を達成するためには、核の相対エネルギーは約20 eV でなければならない。

それと同時に、電子密度が任意の合理的密度のとき、遮蔽半径は核力の作用半径*R<sub>n</sub>*を数倍上回っている。

相互作用する原子核の接近に関する直接的(古典的)な方法に対する代替案は,原 子核のうちの一方が他方の核によって創出されるポテンシャル障壁を量子力学的なト ンネル効果によって透過するという捉え方である。

そのような相互作用の場合には、核反応断面積

$$\sigma = (S(E)/E)P(E) \tag{5.4}$$

は、「内部核断面積」 $\sigma_0$ と準古典的なクーロン障壁透過確率V(r)(ガモフ因子)の積に よって決定される。すなわち、

$$P = \exp[-2W(E)]$$

$$W(E) = \int_{r_1}^{r_2} \sqrt{2\mu(V(r) - E)} dr/\hbar = \sqrt{2\mu(V(E))} |r_2 - r_1|/\hbar$$
(5.5)

ここで*r*<sub>1</sub>と*r*<sub>2</sub>は粒子のうちの一方が他方の場の中を運動するときの古典的な「方向転換点」; μは相互作用する 2 つの質量の換算質量; (*V*(*E*))はレベル *E*より高いレベル にあるポテンシャル障壁の平均高さである。

障壁幅 $|r_2 - r_1|$ (これは座標の線形関数である)が、 (5.5)に平方根の形で含まれている障壁の平均高さ $\langle V(E) \rangle$ より本質的な影響をガモフ因子に対して与えていることが分かる。

純粋な(核相互作用のクーロンポテンシャルエネルギーの遮蔽を考慮に入れない) クーロン相互作用 $V(r) = Z_1 Z_2 e^2 / r$ の場合には、

$$W(E) = 2\pi Z_1 Z_2 e^2 / \hbar v_0 \tag{5.6}$$

となる。ここで $v_0 = (2E/\mu)^{1/2}$ は原子核同士の接近の漸近的な(相互作用領域から遠く離れた所における)相対速度である。

純粋なクーロン相互作用の場合,2つの原子核をある1つの場所で見出す確率密度 は次の波動関数によって決定される(Davydov, 1963)。

$$|\Psi_n(0)|^2 = (2\pi Z_1 Z_2 e^2 / \hbar v_0^2) \exp(-2\pi Z_1 Z_2 e^2 / \hbar v_0)$$
(5.7)

核融合の速度(相互作用する2つの原子核1対当たりの単位時間当たりの確率)は 次のようになる。

$$\lambda_r = \Lambda |\Psi_n(0)|^2 \tag{5.8}$$

ここで $\Lambda = S_0 \hbar / \pi \mu e^2$ は具体的な原子核1対についての核相互作用定数であり、例えば dd 相互作用の場合は $\Lambda \approx 1.5 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$ である。

自然条件下(すなわち、高温加熱や超圧縮力が加わらない場合)においては、トン ネル効果の確率はきわめて小さい。(障壁の透過性が最大であるという点で)最も最適 な自然系——核間距離が $\Delta r \approx 0.74$ Åの重水素分子——の場合でさえ、室温におけるト ンネル効果の確率はほとんどゼロに等しく、 $P \approx 10^{-150}$ である。このことから、 $\lambda_r \approx$  $10^{-72}$  s<sup>-1</sup> というきわめて小さい融合速度が導き出される。

上に挙げたトンネル効果に関するすべての関係式は定常的なシュレーディンガー方 程式にもとづいて得られたものであり、それゆえ、相互作用過程は常に非定常的であ るにもかかわらず、定常的な核相互作用に対してしか当てはまらないことに注意しよ う。相互作用する原子核の系はそれ以前の履歴を持ち、過去のある時点に創出された ものであるという点だけから見ても、あらゆる相互作用は非定常的であることは明ら かである。

公式(5.5)から、障壁の透過性を増大させ、高い融合効率を達成するための2つの自 明な方法が導き出される。すなわち、粒子のエネルギーまたは温度を増大させる方法 (これは熱核融合あるいは加速器による核融合の領域である)と、常温において障壁 幅を減少させる方法(これは系が圧縮されたときのピクノ核融合、また融合に関与す る原子核のうちの例えば1つにより重いミューオンが捕獲されることによって遮蔽半 径が減少したときのミューオン触媒核融合である)である。

ミューオン触媒核融合はフランク(Frank, 1947)とサハロフ(Sakharov, 1948)によって独立に提唱され、その後実験によって検証された(Alvarez, 1957)。このような魅力的なモデルの難点は、何よりもまず、原子核の場を遮蔽する重いミューオンは不安 定粒子であり、その寿命が実際的応用にとっては不十分な約1μsであることに関係し ている。

ピクノ核融合はゼリドヴィッチとゲルシュテイン (Zel'dovich, Gershtein, 1964) およ びハリソン (Harrison, 1964) の論文において提唱された。実際に受け入れ可能な結果 を達成するためには、きわめて困難な課題――凝縮された媒質を10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup>分の1に圧 縮すること。それによって障壁幅を 10~15 分の1 に減少させることができる――を 解決する必要がある。

最適な方法の探求は、1950年代初頭における世界のすべての主導的研究所が融合の最適化のための主要なメカニズムとして核融合メカニズムを選択するという結果を もたらした。現在、それらの研究所は、準安定系内における低圧高温プラズマの長時間の保持を磁気トラップ中で、あるいは100~1000分の1への短時間での圧縮を用い て、あるいはまた凝縮された標的を全方向からレーザー圧縮またはビーム圧縮して慣 性保持する方法によって成功を達成しようと試みている。

最近 50 年間の経験が示しているように,熱核メカニズムにもとづいたこの核反応 実現方法は,(そこでは高温熱核融合プラズマの安定化が重力によってきわめて自然 かつ効率的に行われている恒星とは異なり)地球の条件下ではきわめて困難かつ非効 率的である。熱核融合プログラムに費やされた費用の総額ははるか昔に既に 1000 億 米ドルを超えたにもかかわらず,エネルギー的に有利な核融合を得る見通しは研究が 始まった頃と同様に不確定なままである。

### 5.2.「常温核融合」現象

熱核融合モデルの専門家たちによって承認されていない,核融合研究のさらにもう 1 つの領域が存在する。そのような領域に分類することができるのは,いかなる高エ ネルギー作用も存在しない所で核融合が観測されたとする研究である。

この方向における確実に知られている最初の研究とみなすことができるのは、パラ ジウムの存在下における電気化学的方法による水素からのヘリウムの形成と記録に関 する研究(Paneth, Peters, 1926)である。当時の主導的核物理学者たちがこの研究に 対して完全に懐疑的態度を取り、それを承認しないという一般的な雰囲気が、この研 究結果が誤謬と評価され、科学上の珍事の部類に分類されるという事態を招いた。こ の研究の著者らは核物理学には十分に精通していない化学者であったことが、結局の ところ、このような研究の発展において否定的な役割を演じた。これらの著者は自ら の実験結果を「権威者たち」による批判から擁護し、その現実性を根拠づけることが できなかった。

重水素を含有する結晶に機械的または電気機械的作用が加わったとき、微量の中性 子放出が観測されたというそれより後の研究(Klyuev, 1986; Deryagin and coauthors, 1986; Yaroslavskii, 1986, 1989)に対しても、それと同じように僅かな注意しか払われ なかった。これらの研究に対する科学界の関心の欠如は、おそらく、そこで分析され た結晶中においてはイオン結合が著しい役割を演じており、このことが即座に、イオ ン結合の破壊時における強い電場による加速メカニズムの発現という考えを引き起こ させたという理由によって説明することができる。

この問題に対する関心が一気に高まったのは、重水素によるパラジウムとチタンの 電解飽和の問題に互いに独立に取り組んでいた米国ユタ州の2つの研究者グループに よる発表の後のことであった。ソルトレーク市のフライシュマンとポンス

(Fleischmann, Pons, 1989)は、大量の余剰熱が放出され、中性子と三重水素が記録されたことを発表した。プロボ市のジョーンズ(Jones, 1989)もまた、電解過程でバッ

クグラウンド値のレベルを著しく超える量の中性子が記録されたことを発表した。こ の現象は後に常温核融合という呼び名を与えられた。

これらの研究に関して行われた独立的評価の結果は相反するものであった。

世界の多数の研究所は直ちにフライシュマン,ポンスおよびジョーンズの結果を裏づけ,低エネルギーでの効率的な核反応の進行の新たな,時にはパラドキシカルな(無中性子 dd 核融合タイプの)法則性を検出したが,その効果の繰り返し性は不十分であると指摘した。

それと同時に,熱核融合研究領域におけるその活発な活動で知られている最大の研 究所の大部分は,それらの結果は裏づけられていないと直ちに発表し,常温核融合の 存在の可能性そのものに対してきわめて否定的な態度を表明した。それだけでなく, それらの研究所の圧力の下で,そのような研究の信用の失墜と禁止を目的とした前例 のない行政措置がとられた。信用失墜の方法は異端審問に似ていた。特に米国では, それらの研究への公的助成金をベースとする資金供与に対して公的な禁止が課された。 最も権威ある学術出版物における研究結果の発表の可能性に対しても禁止が課された。 中世以来,科学はそのような「魔女との闘い」行為を知らない。

しかし,「悪鬼は解き放たれ」,核融合に関する代替的方向での科学研究を行政措置 によって止めることはできなかった。欧州,アジアおよび北米の約 50 の専門的研究 グループが常温核融合の研究に取り組み始め,その研究を続けている。

最近 10 年間,常温核融合に関する実験の技術と方法が著しく改善され,より効率 的な核反応が見出され,記録技術が著しく多様化され,その結果,実験結果の確実性 と繰り返し性が著しく向上した。

それらの結果の一部は一連の概説論文(例えば Tsarev, 1990, 1992, 1993) において 述べられている。

最も説得力のある結果として,確実に記録されている中性子の生成(Arata, Zhang, 1992; Takahashi, 1992),余剰熱の発生(McKubre, 1990, 1991, 1992, 1994, 1995, 2000; Storms, 1991, 1996, 2000; Miles, 1990, 1993a,b, 1994, 1997; Miles, Bush, 1994; Miles et al., 2000; Arata, Zhang, 1994, 1995, 1996, 1997, 2000; Takahashi, 1992; Patterson, 1994, 1997),重水素中でのグロー放電中における同位体変換(Karabut, 1992, 1994; Savvatimova, 1992, 1998)および電解時における変換(Iwamura Y. et al., 2000)を挙げることができる。生物系における化学元素変換の検出(Kervran, 1963, 1966, 1968, 1998; Komaki, 1965, 1967, 1993),および微生物培養物中における同位体変換に関する一連の研究(Vysotskii, Kornilova, Samoylenko, 1996, 2000, 2001 [英語論文])は、この問題に直接的に隣接している。

それとともに、「早期」 常温核融合の主な欠点――実験結果の繰り返し性の不十分さ ――はかなりの程度まで残り、最も確実な研究にさえ存在している。

常温核融合の記録方法が持つその他の欠点については、一連の批判的概説論文 (Morrison, 1994; Huizenga, 1993; Taubes, 1993) において指摘されている。

現在では、常温核融合現象を中・高エネルギー領域における核融合現象とは根本的 に異なるものにしている主要な特徴(定常条件下における散発的・非定常的な性格、 最終産物における放射能の事実上完全な不存在、各種反応チャネルの質量分率のきわ めて著しい変化といった特徴)は、確実に確定されているとみなすことができる。こ こでの主要かつ根本的な差異は、言うまでもなく、常温核融合は、高エネルギー領域 において成功裡に機能している理論から出発した場合には完全にそれを禁止するよう な条件の下において進行するという点にある。

このこととの関連において、論理的誤りはどこに含まれているのか?――その誤り は、高エネルギー領域での核反応理論を低エネルギー領域に補外したときに生じるの 49 第5章 生物系における常温同位体変換過程の物理学的側面

か,それとも高エネルギー領域での核反応理論自体が,きわめて低いエネルギー領域 における相互作用に存在している何らかの重要な法則性を最初から無視するように構 築されているからなのか?――という問いが生じてくる。

我々の意見によれば、より正しいのは立てられた問いの後半部分である。それゆえ、 我々は次の第5.3節においてこの意見の根拠づけを試みる。

「常温核融合」現象に関する論文はこれまでに 300 点以上発表されている。それら の論文では、その著者の意見によればこの現象を説明することのできる、あるいは少 なくともその説明への道筋を根拠づけることのできる、様々な物理モデルが様々な度 合いの論拠にもとづいて提唱されている。常温核融合理論は、それは単なる幻想であ るとは考えない自尊心を持ったあらゆる理論物理学者が征服しようと試みる、(有名 なフェルマーの定理に類する)山の頂のようなものである。常温核融合に関する理論 的研究の数は多数に上っており、その内容も多様であるので、それらの研究の一種の 選別・分類を行うことが可能となっている。その作業は、理論的研究の数が「臨界質 量に達した」後の時期に概説論文(Chechin et al., 1994)において開始された。最近の 概説論文の中では、論文(Kirkinskii, Novikov, 1998)を挙げることができる。これらの 概説論文ではほとんど同様の、論理的な根拠のある分類システムが用いられている。 我々も(僅かな例外を除いて)その分類システムに従うことにしよう。[以下において示 される] これらの概説論文のデータには、より最近の研究に関するデータが我々によっ て補足されている。

## 5.2.1.加速モデル <sup>[訳注]</sup>

(Deryagin et al., 1986; Golubnichii et al., 1989; Fleischmann, Pons, 1989; Lipson, 1989; Cohen, Davies, 1989; Joyce, 1989; Gac et al., 1989; Cassandro et al., 1989; Goldanskii, Dalidchik, 1989; Pool, 1989; Takeda, Takizuka, 1989; Tsarev, 1990, 1991; Zelenskii, Rybalko, 1990; Lin et al., 1990; Rabinovitz, Worledge, 1990; Tabet, Tenenbaum, 1990; Jorne, 1990; Filimonov, 1990; Zhang, 1991; Chechin, Tsarev, 1992; Yasui, 1992; Chechin et al, 1994; Kühne, 1994; Varaksin et al., 1991; Fedorovich, 1991, 1992, 1993 [英語論文]; Fedorovich, 1995 [ロシア語論文]; González-Martin et al., 1993; Arata, Zhang, 1995; Kazachkovskii, 1995)

### 5.2.2. 電子遮蔽によるクーロン障壁の減少

(Vaselli, 1989; Fujita, 1989; Burrows, 1989; Koonin, Nauenberg, 1989; Parmenter, Lamb, 1989; Mazitov, 1989; Bhattacharjee, 1989; Bussard, 1989; Rabinovitz, Worledge, 1989; Karasevskii, 1989; Feng, 1989; Ichimaru, 1989, 1990, 1993; Jändel, 1990; Balian et al., 1989; Davydov, 1989; Rabinovitz, 1990; Azbel, 1990; Hora et al., 1990, 1993, 1998; Seeliger, 1991; Kim, 1991; Rambaut, 1992; Demidenko, Simakov, 1993; Harrison, 1994; Fimin, 1996; Violante, De Ninno, 1996)

#### 5.2.3. 結晶格子の関与下におけるコヒーレント効果と干渉効果

(Vysotskii, Kuzmin, 1981; Turner, 1989; Bressani, 1989; Bush, 1990; Christos, 1990; Danos, 1990; Chatterjee, 1990; Preparata, 1990, 1991, 1995, 1996; Danos, Belyaev, 1991;

<sup>&</sup>lt;sup>[訳注]</sup> この PDF 版の第 5.2.1 節~第 5.2.9 節では,原著書の本文はすべて省略され,引用文献のみが挙 げられている。

Vaidya, 1991; Kim, Zubarev, 1993; Kim, 1994; Kim et al., 1994; Fedorovich, 1994; Sapogin, 1994, 1997)

#### 5.2.4. 原子核のフェルミ凝縮とボース凝縮

(Matsumoto, 1989; Vysotskii, Kuzmin, 1990, 1991, 1994; Greenland, 1990; Dienes, 1991; Nordlander et al., 1992; Vysotskii, Kuzmin, 1991; Vysotskii, 1994; Chubb, Chubb, 1990, 1991, 1993; Waber, 1997; Kim, 2000)

#### 5.2.5. 結晶格子のフォノンによって促進された反応

(Schwinger, 1989, 1990; Petrillo, Sacchetti, 1989; Hagelstein, 1990, 1994, 1997, 1998; Baldo et al., 1990; Crawford, 1992; Tisenko, 1993; Rambaut, 1994; Rao, Chaplot, 1994; Liu, 1996; Swartz, 1996)

#### 5.2.6. エキゾチック化学

(Mills, Farrel, 1990; Cerofolini, Re, 1990; Gann, Pokhodyashchii, 1990; Gryzinski, 1990; Barut, 1990; Moizhes, 1991; Mills, Kneizys, 1991; Maly, Vávra, 1993; Samsonenko, 1996, 1997)

#### 5.2.7. 重い(トランスミューオン)粒子による触媒作用

(Shaw et al., 1889; Takahashi, 1989, 1991; Rafelski et al., 1990; Bazhutov, Vereshkov, 1992, 1993; Nedospasov, Mudretskaya, 1995)

#### 5.2.8. 中性子の作用下における反応

(Kim, 1989; Anderman, 1990; Hagelstein, 1990, 1991; Matsumoto, 1989, 1990a; Fisher, 1992; Lipson et al., 1993; Lipson, Sakov, 1994; Kozima, 1994, 1996)

#### 5.2.9. 特異な核効果

(Schwinger, 1989; Becker, 1989; Ragheb, Miley, 1989; Paolo, 1989; Shibab-Eldin et al., 1989; McNally, 1989; Kim, 1989, 1990; Frodl et al., 1990; Zakowicz, 1990; Kim et al., 1990; Rabinowitz, 1990a; Pokropivny, Ogorodnikov, 1990; Russel, 1990; Chatterjee, 1991; Kenny, 1991; Tsuchiya, 1994; Mayer, Reitz, 1991; Yang, 1991; Istomin, Kaliev, 1994; Arata, Zhang, 1996; Samsonenko, 1996, 1997; Takahashi, 1998; Dufour et al., 1998; Kim, Zubarev, 2000)

### 5.3. 生物系における「常温核融合」現象の実現の特殊性

#### 5.3.1. 生物系における常温核融合の実現の特異なメカニズムは存在するか?

「常温核融合」現象の理論的モデルの数の多さと多様さは、物理学の古典的な対象 物とモデル(原子核,電子,結晶,プラズマ)に対してのみ当てはまる。生物学的対 象物を自然界のこの系列から区別する,何らかの特異性は存在するか?「生物学的変 換」という呼び方は正しいのか? それとも,それはただ単に普通の変換にすぎず,生 物系において進行するという違いがあるだけなのか? 増殖中の微生物培養物中にお ける変換融合反応を進行させることができるのは、いかなるメカニズムなのか?

これらのきわめて複雑な問いに答えるため、何よりもまず、常温下においてそれ以 外の極端な条件が存在しない状態で核反応を効率的に進行させることが(我々の意見 によれば)可能であると思われる諸過程の概念的基礎を精緻化しよう。

第1に、伝統的な核物理学(特に相互作用過程と散乱過程に関係する部分)は、対 ごとの相互作用過程はきわめて小さい領域内において進行し、きわめて強い場(原子 核内の場あるいはクーロン場)の作用によって引き起こされているのだから、相互作 用領域の範囲から遠い所に存在している物体と場の影響は、常にアプリオリに非本質 的である、すなわち事実上稀な例外であり、核相互作用は周囲から完全に遮断されて いるという理解にもとづいて構築されている。その際、その根拠としては、普通、相 互作用する粒子の波動性(相互作用の局所的性格ではなく、大域的性格をもたらして いる性質)の発現の仕方は、エネルギーと運動量の増大とともにより弱くなるという 論拠が用いられている。それだけでなく、、原子核間の相互作用エネルギーは周囲媒質 中における相互作用の特性エネルギーよりはるかに強いという言及自体が、周囲媒質 が核過程に及ぼす影響は無視できることを自動的に立証しているかのようにみなされ ている。

現実には、あらゆる微視的物体は波動性を持っているのだから、そのような概念は 疑いの余地のない概念ではまったくない(しかもそれは、相互作用する粒子のエネル ギーが小さい領域においてのみではない)。そのような概念の誤謬性は例えばメスバ ウアー効果に現れている。メスバウアー効果はガンマ線放射と原子核の相互作用過程 がマトリックスの巨視的性質に依存していることを明確に示している。さらにもう 1 つの例証とすることができるのは、チャネリング問題において、高速電子が規則格子 と相互作用するとき、粒子の波動性は粒子のエネルギーが大きいほどより強く発現す るという事実である(これはコヒーレント散乱領域の長さが粒子の運動量に比例して 増大することに起因している。それゆえ、相対論的粒子の場合、その長さは原子間距 離を著しく上回り、巨視的値に達する可能性がある)。希薄空気の誘電率が大気上層に おけるきわめてエネルギーの大きい宇宙線の変換ダイナミクスに及ぼす影響が小さく ないことも、上述したことの裏づけとして挙げることができる。

第2に、常温核融合問題における核過程の進行に関する可能なシナリオの記述のために用いられている事実上すべての量子力学的モデルは、定常的(または準定常的) アプローチにもとづいている。

このことの裏づけとなるのは、例えば、核融合過程の分析にとって基礎的な概念で ある反応断面積の概念が、(反応断面積というものを、飛来粒子束の密度が単一である ときに1個の標的粒子のものと認められる反応確率として理解するならば)実際には それは反応断面積であるにもかかわらず、厳密に定常的な特性として用いられており、 非定常的時間関数は過程の初期においては常に無条件にゼロに等しいとされている事 実である。この結論はハイゼンベルクの不確定性関係から直ちに導き出される。なぜ なら、相互作用の開始時点( $\delta t \rightarrow 0$ のとき)における飛来粒子のエネルギー $\delta E \ge \hbar/2\delta t$ の不確定性は、その相互作用チャネルが実現される特性エネルギー領域 $\Delta E$ に対して常 に無限大であり、このことが直ちに、その具体的な反応チャネルの質量分率が小さい ことを証明するからである。 $\delta E$ のそのような増大効果は、ときには粒子のオーバーバ リア通過の予想のために用いられていることを公正を期するために指摘する必要があ る。

文献(Vysotskii, Kuzmin, 1989)においては、相互作用過程の開始時点に緩和過程の存在によって反応断面積の非定常性と消滅をもたらす、もう1つのメカニズムが検討されている。任意の混合系(例えば、既存のサーモスタットと常に結びついている2

つの原子核からなる系。そのサーモスタットの役割は、原子核を取り囲んでいる原子 自体の電子、量子化された電磁場やパイオン場などが演じている)における相互作用 過程の適切な記述は、密度行列法にもとづいた場合にのみ行うことができる。このこ とが、理想化された純粋に対ごとの相互作用のみが考慮され、周囲との相互作用が完 全に無視されている場合に波動関数を用いて記述することが可能な2粒子の形の純粋 系から複合系を区別する特徴となっている。そのような課題の分析は、反応断面積は 非定常的時間関数であり、その関数は、非対角行列要素の緩和時間よりはるかに小さ い時点の場合にはゼロに等しいか、またはきわめて小さく、その緩和時間を著しく超 えている時点の場合にのみ、その定常値に漸近的に移行することを示している

(Vysotskii, Kuzmin, 1974)。しかも非対角行列要素の緩和時間は、サーモスタットとの結びつきの強化ととも減少するにもかかわらず、ゼロと等しくなることはけっしてない。このことから、「相互作用の投入」後におけるきわめて小さい時点において、その相互作用に対する系の応答はゼロに等しいという単純な論理的結論が導き出される。 当然のことながら、まさにこのことがクーロン場における散乱といった相互作用のありふれた結果にも当てはまる。

これらの現象は、相互作用の開始時点からの小さい時間における反応断面積の(散 乱の部分における)特徴の分析と関係を持っている。しかし、反応の非定常性(これ には散乱断面積の消滅も含まれる)はそれに続く諸時点にも発現する。

我々の意見によれば、これらの事情の考慮が問題を解くための一種の鍵の1つとなっており、適切な理論はこれらの事情を必ず考慮しなければならない。

おそらく、このことが最も大きく当てはまるのは増殖中の生物系に対してであろう。 生命活動の過程の連続性により、生物系は原理的に非定常的であり、当然、(特に分子 レベルにおいて)相対的な安定性と絶対的な変動性を兼ね備えており、この点で定常 的な結晶や準定常的なプラズマとは絶対的に異なっている。しかも、連続的なタンパ ク質合成やそれと同じ程連続的な細胞再生産が行われるときの輸送系や酵素系におけ る過程の性格そのものが、各種の分子複合体の(転義的な意味,機能的な意味,また 直接的な立体配座という意味における)直接的な作用と制御の下で進行する分子過程 に直接的に基礎を置いている。

この命題を裏づけるためには、その直径と形状がイオンの種類に対して適応的かつ 合目的的に反応しながら連続的に変化する膜チャネル中における選択的輸送を例とし て挙げれば十分である。そのような変動性と安定性が平均的に組み合わされている例 は無生物界には存在しない。

これらの事情は、相互作用する粒子(この場合は核融合と変換に関与する原子核)、 そして相互作用領域に直接的に隣接している物体の量子力学的特性を順序立てて考慮 する必要があることを明確に示している。

我々の意見によれば、そのような特性の発現こそが生物系における常温核融合と変換の進行の顕著な特徴をなしている。このように、同位体の「生物変換」という概念 は本質的には誤りであり、「生物系において進行する変換」というより正確な定義に代 えられなければならないとはいえ、しかし、その本性の点でダイナミックな生物系に おける変換の特異性は疑いの余地なく存在しており、そこにおける変換過程は他にお けるよりはるかに効率的であることが判明している。

## 5.3.2. 定常モードにおける最適量子化ポテンシャル井戸中における無障壁核融合のあ り得るメカニズム

上に列挙した要件に最も適合しているのは、いかなるモデルであろうか? ダイナ

ミックな生物系の場合において最も効率的なメカニズムは、我々が以前に提案した (Vysotskii, 1994; Vysotskii et al., 1996, 2000)、放物型に近い構造を持つポテンシャル

井戸中において核反応に対するクーロン障壁の影響を短時間除去する能力を持ったメ カニズムである。

我々によって行われた増殖中の微生物系におけるメスバウアー同位体の融合反応 Mn<sup>55</sup> + d<sup>2</sup> = Fe<sup>57</sup> (Vysotskii, Kornilova, Samoylenko, 1996)を例に取ってこのメカニズ ムをより詳しく検討しよう。

マンガン原子1個が三次元放物型ポテンシャル井戸の中心に存在していると仮定しよう。解離過程のおかげで、液体培地中には大量の自由重陽子が存在する (T = 300 Kのとき、解離確率は $\xi \approx 10^{-10}$ である)。解離の結果重陽子dが井戸に落ち込むと、井戸中に複合体Mn+dが出現する。その複合体に結晶格子の共有電子が付け加わる。自由空間中においては、その複合体は共有結合またはイオン結合によって分子を形成することはできないが、しかし、例えばファンデルワールス力により、きわめて低い温度において安定した準分子(MnD)<sup>+</sup>を形成することができるはずである。量子化された系においては、状況はより複雑である。

荷電粒子の場合の散乱過程は主として原子核のクーロン斥力によって決定され、

$$r < a/Z$$
  $(a \equiv \hbar^2/me^2)$ のとき $V(r) = Ze^2/r > 0$ 

である。

このエネルギーは小さな補正にすぎず,量子系における原子核の運動に影響を及ぼ さないということは可能であろうか? もし可能であるとすると,では,それはいかな る条件のときに可能なのか?

これらの問いに答えるため、井戸中における相互作用と散乱の過程について検討し よう。

マンガン原子核上における粒子(重陽子)の散乱に関する問題を,この場合にこの 問題をより適切に記述することのできる運動量的理解に従って検討しよう。

クーロン障壁の影響の短時間排除過程の本質についてより詳しく検討するため、ま ず最初に、相互作用する粒子の一方はずっと井戸中で静止しており(古典的な散乱中 心)、2番目の粒子は井戸の場および1番目の粒子との相互作用を考慮に入れた量子力 学の法則に従って運動するというモデルの問題を検討しよう。

ポテンシャル井戸中で運動する粒子の波動関数*U(r)*は、井戸中における粒子のエネ ルギー準位*E<sub>p</sub>のスペクトルおよびそのエネルギー準位に対応する粒子の固有座標関* 数*Ψ<sub>p</sub>(r)*によって決定されるコヒーレントな重ね合わせ

$$\Psi(r,t) = \sum_{p} C_{p} \Psi_{p}(r) \exp(-iE_{p}t/\hbar)$$
(5.9)

の形を持っている。

シュレーディンガー方程式は次の形を持っている。

$$i\hbar\partial C_{p_{0}}/\partial t = \sum_{p} C_{p} V_{p_{0}p} \exp[i(E_{p} - E_{p_{0}})]/\hbar$$
$$V_{p_{0}p} = \int \Psi_{p_{0}}^{*}(r) V(r) \Psi_{p}(r) d^{3}r$$
(5.10)

問題を具体化しよう。1 個の粒子が時点t = 0に井戸に落ち込んだとしよう。初期時 点における粒子の状態はエネルギー $E_{p_0}$ と波動関数 $\Psi_{p_0}(r)$  (このとき $C_{p_0} = 1$ )によって 特徴づけられる。 ボルン近似においては, 粒子の散乱過程は方程式

$$\hbar \partial C_p / \partial t = C_{p_0} V_{pp_0} \exp[i(E_{p_0} - E_p)]/\hbar$$
(5.11)

によって記述される。

クーロンポテンシャル上における散乱問題のためにボルン近似を利用することの根拠に対する疑問は、ボームによって量子論に関するその有名な著書(Bohm, 1965)において余すところなく述べられている。「ボルン近似は、その適用可能性に関する一般的判定基準のどれ1つとして満たされていないにもかかわらず、驚くほど良い結果をしばしば与えている。これは次の理由によってもたらされている。

原子の境界近傍における力はクーロン力から離れた所にある。しかし、原子核の電 荷の大部分は電子によって遮蔽されているため、その力は小さい。それゆえ、そこで ボルン近似が適用可能なのは、ただ単にV(r)が小さいからにすぎない。原子の内部に おけるポテンシャルV(r)はきわめて大きいので、ボルン近似はまったく役に立たない と予想することができる。しかし、そこには遮蔽もクーロンポテンシャルも存在しな い。それゆえ、そこでの正確な結果はボルン近似が与える結果に近い。したがってボ ルン近似は原子全体において比較的良い結果を与える。しかし、ボルン近似は一般的 な命題によって説明することができない」。

初期条件 $C_{p_0}(0) = 1$ ,  $C_p(0) = 0$ のとき,運動方程式の解は次の形を持つ。

$$|C_p(t)|^2 \equiv W_{p_0p}(t) = |V_{p_0p}|^2 \frac{\sin^2[(E_{p_0} - E_p)t/2\hbar]}{[(E_{p_0} - E_p)/2]^2}$$
(5.12)

この表式は、散乱中心(他方の粒子)との相互作用による、エネルギー $E_{p_0}$ の初期状態  $\Psi_{p_0}(r)$ からエネルギー $E_p$ の任意の別の状態 $\Psi_p(r)$ への遷移を伴う粒子の散乱確率とい う明瞭な意味を持っている。

この確率はかなり複雑な非単調時間関数であることに注目しよう。

この問題のこれ以降における分析は、次の2つの場合において原理的に相異なった ものとなる。

a)上に挙げた,従来用いられている,他の物体と場を考慮しない自由空間中における純粋に対ごとの相互作用モデル

b) 我々が検討している,具体的な量子化場U(r)中における粒子の相互作用に関する 問題の場合

a)まず最初に,従来の自由空間中における散乱モデルにもとづいた散乱問題の分析 について検討しよう。

無限に増大する量子化体積V<sub>0</sub>によって近似される自由空間の場合には,運動量空間 中における,相異なる運動量値に対応する最終状態の三次元密度

$$\rho(p) \equiv dN/dp = (d/dp) \iiint d^3x \oiint d^3p/(2\pi\hbar)^3 = V_0/(2\pi^2\hbar^3)$$
(5.13)

を導入することができる。

相異なる運動量値を持ち、量子化領域の大きさが無限に増大する ( $V_0 \rightarrow \infty$ )運動量空間中においては、隣り合う許容状態の間の距離

$$\rho(p)^{-1} = (2\pi^2\hbar^3)/V_0 \tag{5.14}$$

は無限に減少することが分かる。

次に,立体角δΩと最終運動量pの方向への粒子の微分散乱確率は次の形を取る。

$$dW(p,t) = \rho(p) |C_p(t)|^2 dp_x dp_y dp_z = \rho(p) |C_p(t)|^2 p^2 dp \delta\Omega$$
(5.15)

次に、エネルギーと運動量の非相対論的関係 $E_p = p^2/2M$ を用いることにより、エネルギーの最終状態密度

$$\rho(E_p) = \sqrt{2M^{3/2}E_p}\rho(p)$$

を導入し、粒子がそれと同じ $\delta\Omega$ 方向へ散乱し、それと同時に区間 $dE_p$ 内においてエネルギー $E_n$ の状態に遷移する微分確率を決定する形

$$dW(E_p, t) = \rho(E) |C_p(t)|^2 dE_p \delta\Omega$$
(5.16)

に(5.15)を変換することができる。

(5.13)を代入すると、時刻tにおける $\delta\Omega$ 方向への粒子の全散乱確率に関する次の表式 が見出される。

$$\delta W(t) = \rho(E) \delta \Omega \int |V_{p_0 p}|^2 \frac{\sin^2 [(E_{p_0} - E_p)t/2\hbar]}{[(E_{p_0} - E_p)/2]^2} dE_p$$
(5.17)

この先においては, 普通, この問題は次のように取り扱われる。ディラックのデル タ関数の定義の1つ(この定義は *t*の値が大きいときに用いられる)

$$\frac{\sin^2 xt}{\pi t x^2} = \delta(x) \tag{5.18}$$

を用いると、表式(5.17)は容易に積分することができ、その結果、立体角δΩの方向への全散乱確率に関する良く知られている最終表式

$$\delta W(t) = (2\pi/\hbar) t \rho(E) |V_{p_0 p}|^2 \delta \Omega$$
(5.19)

が直ちにもたらされる。

(5.19)より、 $\rho(E_p)$ に関する自明な表式を代入すると、定常散乱断面積に関する次の 公式(Bohm, 1965)を見出すことができる。

$$\sigma = \left| V_{p_0 p} \right|^2 (2\pi M/\hbar^2)^2 \tag{5.20}$$

(5.18)より、散乱確率はどこでもゼロに向かって行くことなく、時間の増大ととも に単調に増加することが分かる。散乱中心における粒子の散乱断面積(5.19)もゼロと は異なっている。このことは、結局のところ、ある原子核の散乱は強く、その原子核 が他の原子核の局在化領域に入り込む確率は小さいということに相当する。

これらの公式は、いくつかの制限の下で(特に、量子化体積V<sub>0</sub>は限りなく増大するという条件――この条件は自由空間への移行および他の物体の存在の無視に相当する ――の下で、きわめて大きいtのときにのみ妥当する漸近公式(5.18)を用いて)得られたものであるにもかかわらず、普通、普遍的な公式として(核反応の実現条件の分析の際にも)用いられている。

b)離散的準位分布を持つ具体的な量子化場U(r)における粒子の相互作用と散乱の 問題に関する代替的な検討を行おう。

上記において検討されている三次元放物型井戸に相当する状況について検討しよう。 この井戸のポテンシャルエネルギーは

$$U(r) = kr^2/2 = M\omega_0^2 r^2/2$$
(5.21)

である。ここで $\omega_0 = \sqrt{2U_0/MR^2}$ ;  $k = M\omega_0^2$ ;  $U_0 \equiv U(R)$ は放物型ポテンシャル井戸の壁の高さである。

放物型ポテンシャル井戸の場合,エネルギー準位スペクトルも等距離であり,井戸 の底からカウントされ,次の形を持っている。

$$E_n = \hbar \omega_0 (n+3/2), \ n = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots$$
 (5.22)

上記において見出された具体的なエネルギー準位*E*pの占有を伴う散乱の確率は (5.13)の解によって決定され,次のようになる。

$$W_{p_0p}(t) \equiv |V_{p_0p}|^2 F((E_{p_0} - E_p), t)$$

この式における時間とエネルギーに対する依存性は次の関数によって決定される。

$$F(E,t) = \frac{\sin^2 [(E_{p_0} - E_p)t/2\hbar]}{[(E_{p_0} - E_p)/2]^2}$$
(5.23)

(5.22)の準位のエネルギーを関数(5.23)に代入すると、次式が見出される。

$$F(E,t) = \frac{\sin^2[\omega_0 t(n_0 - n)/2]}{\hbar^2[\omega_0(n_0 - n)/2]^2}$$
(5.24)

関数*F(E,t)*およびそれと結びついている散乱確率は時間の振動関数であり、ゼロの 等距離分布によって特徴づけられることが分かる。

このことは、具体的な放物型ポテンシャル井戸中において、逐次的な時点(粒子が 緯度に落ち込んだ時点*t* = 0から開始する)

$$\tau_k = 2\pi k/\omega_0, \ k = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots$$
(5.25)

に関して、初期準位 $E_{n_0} \equiv E_{p_0}$ から任意の準位 $E_n \equiv E_p$ への被散乱粒子の遷移を伴う、ある粒子の他の粒子上における散乱確率はゼロに向かっていくということを意味している。

この状況は、図 5.1 において逐次的な 3 つの時点に関して描き出されている。

そのような効果の明白な原因は、他ならぬ最適時点τ<sub>k</sub>には、粒子の相互作用スペクトル中に、準位間遷移または許容固有状態に相当するエネルギーを持つ成分が存在しないことである。クーロン散乱作用に対する干渉抑制が生じる。そして量子化された場*U*(*r*)中には固有状態と異なるエネルギー準位と状態は存在しないので、それらの最適時点には、そもそも散乱は禁止されている。このことは、それらの最適時点には(ま



図 5.1.3 次元放物型ポテンシャル井戸中におけるエネルギー準位 $E_n$ と全散乱確率の間の関係:相互作用する2つの粒子がその井戸中に一緒に存在している時間が短い場合 ( $t < \tau_k$ ),最適な場合 ( $t = \tau_k$ )および大きい場合 ( $t > \tau_k$ )

た当然のことながら、すべての $\tau_k$ 値の近傍の小さい時間の範囲内においては)、クーロン斥力の作用は取るに足らないものになっていることに対応している。それらの時点には、粒子の状態は、粒子の相互作用にはまったく依存せず、量子化場の性質によってのみ決定される。

粒子の一方が井戸中に固定され,2番目の粒子が1番目の粒子およびポテンシャル 井戸の場との相互作用の性格に従って運動するという以上において検討した場合を2 つの粒子が運動する場合に一般化することは容易である。

2つの粒子が同一のものである場合には、それらの粒子は共通の量子準位系を持つ。 このとき、(5.25)の時点 $\tau_k$ における一方の粒子の散乱に対する禁止は、自動的に他方の 粒子の散乱を禁止する。

2 つの粒子が相異なるものである場合には、その各粒子は、ポテンシャル井戸中における自分のエネルギー準位系、自分の特性周波数ω<sup>(i)</sup>、したがってまた(5.25)の自分

の時点値 $\tau_k^{(i)}$ によって特徴づけられる。このとき、散乱が生じることは不可能である。 しかし、一方の粒子の散乱が生じる唯一の原因は他方の粒子との相互作用であるのだ から、ある時点 $\tau_k$ における一方の粒子にとっての散乱に対する禁止は、他方の粒子に とっての散乱に対するそれと同じ禁止と一致する。こうして、各粒子にとっての $\tau_k^{(i)}$ 値 の組に対応する時点においては、クーロン障壁の作用は除去される。

それらの時点においては、ガモフ因子 $P = \exp[-2W(E)]$ はゼロではなくなり、融合反応の有効断面積 $\sigma = (S(E)/E)P(E)$ は内部核断面積 $\sigma_0 = (S_0/E)$ と一致する。

時点 $\tau_k$ において、同一の井戸中における 2 つの粒子の局在化はそれらの相互作用に よってではなく、量子化ポテンシャル場の独立した影響によって決定されるという事 実は、他方の粒子が存在する場所における一方の粒子の波動関数 $\Psi_n(0)$ はトンネル効 果に依存しておらず、その結果、任意であることが可能である(その波動関数は場 $U_0$ における量子化の条件のみから決定される)という結論に導く。

特に,準古典近似においては,各粒子の波動関数 $\Psi_n(\mathbf{r}_A)$ , $\Psi_\alpha(\mathbf{r}_B)$ の強度は次の表式に よって決定される。

$$|\Psi_{n}(\mathbf{r}_{A})|^{2} \approx 2/\left[\pi^{2}R_{n}^{3}\left(1-r_{A}^{2}/R_{n}^{2}\right)^{1/2}\right], \ \mathbf{r}_{A} \leq R_{n}$$
$$|\Psi_{\alpha}(\mathbf{r}_{B})|^{2} \approx 2/\left[\pi^{2}R_{\alpha}^{3}\left(1-r_{B}^{2}/R_{\alpha}^{2}\right)^{1/2}\right], \ \mathbf{r}_{B} \leq R_{\alpha}$$

ここで $R_n = (2E_n/M\omega_0^2)^{1/2} = [2\hbar(n+3/2)/M\omega_0]^{1/2}$ は放物型ポテンシャル井戸中におけるエネルギー $E_n$ を持つ粒子の振動の古典的振幅である。

反応に関与する粒子がそのように非局在化された分布を持っているときの反応速度 は(5.8)を一般化した次の公式によって記述される。

$$\lambda_{r} = \Lambda \int |\Psi_{n}(\mathbf{r})|^{2} |\Psi_{\alpha}(\mathbf{r})|^{2} d^{3}r \approx \\ \approx (16C/\pi^{2}R_{n}^{3}R_{\alpha}^{3}) \int_{0}^{R_{max}} (1 - r^{2}/R_{n})^{-1/2} (1 - r^{2}/R_{\alpha}^{2})^{-1/2} r^{2} dr$$
(5.26)

公式(5.26)において、R<sub>max</sub>は次の関係式によって決定される。

 $R_n \leq R_{\alpha}$ ならば $R_{\max} = R_n, R_n \geq R_{\alpha}$ ならば $R_{\max} = R_{\alpha}$  $R_n \gg R_{\alpha}$ または $R_{\alpha} \gg R_n$ の場合には, (5.26)より次式を得る。

$$\lambda_r \approx \Lambda |\Psi_{n,\alpha}(0)|^2 = 2\Lambda/\pi^2 R_{\max}^3$$
(5.27)

特に,  $R_{\text{max}} = 3$ Åの場合には, dd 融合の反応速度は $\lambda_r \approx 10^6 \text{ s}^{-1}$ となる。これは $D_2$ 分子中における dd 融合の反応速度の $10^{78}$ 倍である。

さらにもう1つの事情が重要である。

(5.26)から導き出されるように、核融合の最適化条件は、量子化ポテンシャル井戸 の小さい体積V<sub>0</sub>とΛの大きい値を用いることを要求する。V<sub>0</sub>の値の最適化に関する問 題はこの先において検討される。Λに関しては次のことを指摘する必要がある。

具体的な原子核対に関する核融合定数 $\Lambda = S_0 \hbar / \pi \mu e^2$ は、原子核パラメーター $S_0$ の大きさおよび相互作用する 2 つの粒子の換算質量 $\mu$ によって決定される。パラメーター $S_0$ は相互作用する原子核のタイプに依存し、原子番号の増大とともにきわめて急激に増大する。

例えば,相互作用する2つの陽子の場合(pp融合反応)には, $S_0 \approx 3.5 \cdot 10^{-25} \text{ MeV} \cdot$ bである。これは極限的に小さな値 $\Lambda_{pp} \approx 10^{-39} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ と極端に小さな核反応速度に相当する。

陽子が重陽子と相互作用する場合(pd 融合反応)には、 $S_0 \approx 2.6 \cdot 10^{-5} \text{ MeV} \cdot b$ である。これは $\Lambda_{pd} \approx 5 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ に相当する。

dd 相互作用の場合には、 $S_0 \approx 0.11 \text{ MeV} \cdot b \ge \Lambda_{dd} \approx 1.5 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ である。

炭素の核相互作用( $C^{12} - C^{12}$ 融合)の場合には、原子核パラメーターは $S_0 \approx 8.8 \cdot 10^{16} \text{ MeV} \cdot b$ (Ichimaru, 1999)であり、これは $\Lambda_{C^{12}C^{12}} \approx 20 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ をもたらす。

核相互作用 $C^{12} - O^{16}$ の場合には,  $S_0 \approx 1.15 \cdot 10^{21}$  MeV · b (Ichimaru, 1999) である。 これは $\Lambda_{C^{12}O^{16}} \approx 2.3 \cdot 10^5$  cm<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>に相当する。

最後に,酸素の核相互作用 ( $0^{16} - 0^{16}$ 融合)の場合には,原子核パラメーターはさらに増大して $S_0 \approx 2.3 \cdot 10^{28}$  MeV · b (Ichimaru, 1999)となり,このことが $\Lambda_{0^{16}0^{16}} \approx 3.9 \cdot 10^{12} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ という極端に大きな核融合定数をもたらす。 $\Lambda_{0^{16}0^{16}}$ のこのような大きな値がきわめて大きな変換速度をもたらしている。

原子番号の増大に伴う $S_0$ と $\Lambda$ のこれほどまでに急速な増大は、それらが関与する融合がエネルギー的に有利となるようなすべての原子核の場合において続いていくとみなすための、あらゆる根拠が存在する。

上記の事情は、反応に関与する原子核の原子番号が増大するにつれて無障壁核融合 の確率が著しく増大するという新たな予想外の結論に導く!

定性的には、そのような効果は、フェルミ球内のイオン上において導体中を運動す る電子のクーロン散乱に対する禁止と類似している。しかし、フェルミ球の場合には、 散乱に対する禁止は、エネルギー準位上に自由状態(非占有状態)が存在しないこと と関係している。それに対して、ここで検討されている場合には、そのような禁止は、 ある一定の時点において、散乱ポテンシャルの必要とされるスペクトル成分(井戸中 のエネルギー準位間におけるあり得るすべての遷移の周波数に対応するスペクトル成 分)が存在しないことと関係している。この効果が、非定常的な散乱過程に関する考 慮(相互作用が開始された時点の存在)、また散乱過程に対してはポテンシャル井戸の 構造が直接影響を及ぼしていることと直接関係していることは明らかである。

このことは、極限移行を行ったときに得られる結果から直接導き出される。

散乱過程の開始後の時間を無限に増大させると(このとき $t \rightarrow \infty$ ),表式(5.24)の急速に振動する関数 $\sin^2[\omega_0 t(n_0 - n)/2]$ が 1/2 になり,表式(5.24)自体は独自の,常にゼロでない漸近形

$$F(E, t \to \infty) = \frac{1}{2\hbar^2 [\omega_0 (n_0 - n)/2]^2} \neq 0$$
(5.28)

を取ることは明らかである。このとき、当然のことながら、散乱確率

$$W_{p_0p}(t) \equiv \left| V_{p_0p} \right|^2 F\left( \left( E_{p_0} - E_p \right), t \right)$$

もまた,すなわち,結局のところクーロン斥力の作用もまた,任意の準位への遷移に 関してゼロではないものになる。

それと同様に、量子化系(ポテンシャル井戸)のサイズが無限に大きくなると(このとき $R \rightarrow \propto, \omega_0 = \sqrt{2U_0/MR^2} \rightarrow 0$ )、散乱抑制の最適時点 $\tau_k \rightarrow 2\pi k/\omega_0 \rightarrow \propto$ もまた到達不可能となる。

それだけでなく,準位の離散性の消失

## $E_{n+1} - E_n = \hbar \omega_0 \rightarrow 0$

によって量子化系のサイズがそのように無限に増大すると,上記において検討した連 続近似に移行しなければならなくなる。

この場合にも、すべての準位への散乱を一度に完全に抑制することは不可能となる ことは明らかである。

クーロン障壁の影響の短時間抑制に関して得られた特徴は,量子化系の性質(何よ りもまず,量子化系の温度)に対するある一定の要件を提示する。

粒子がポテンシャル井戸に落ち込んだとき,熱励起による拡散の結果,粒子は井戸 から脱出することができる。井戸中における粒子の滞在時間

#### $t = (2\pi/\omega_0)\exp(\varphi_i/kT)$

は、温度Tおよび井戸の頂上までのエネルギー区間 $\varphi_i$ (活性化エネルギー)によって決定される。温度Tが高いときは、t値はきわめて小さく( $t < \tau_k$ )、粒子はクーロン障壁の作用の抑制が生じ得るよりも早く井戸を脱出する。温度がそれより低いときは、粒子は条件 $t > \tau_k$ が満たされるのに必要とされるよりも長い間井戸中に存在することができ、このことが時点 $t = \tau_k$ において、反応に対するクーロン障壁を抑制する可能性をもたらす。

このように、媒質の温度に対する制限*T < T<sub>cr</sub>が存在する。ここで* 

$$k_B T_{\rm cr} = \varphi_i \ln(\omega_0 \tau_k / 2\pi) = \varphi_i \ln(k) \tag{5.29}$$

である。

ln(k)が条件1 < ln(k) < 10を常に満たすことを考慮すると、媒質の温度がポテンシャル井戸の活性化エネルギーより低ければ、媒質の温度に対する要件は満たされる。

さらにもう1つの事情に注目しよう。

2 つの粒子が同一の共通のポテンシャル井戸中にかなり長い間滞在することができ るためには(2 つの粒子が互いの存在に「気づかず」,あたかも他方の粒子が存在しな いかのように運動するという上記において検討したメカニズムが実現しているとした とき),周囲の影響を考慮に入れた 2 つの原子核の平均相互作用エネルギーがゼロで ある必要がある。そして量子力学の形式主義の言葉で言えば,粒子nと粒子αの相互作 用エネルギーの対角行列要素はゼロでなければならない。すなわち,

$$\begin{split} V_{n\alpha,n\alpha} &= \iint \Psi_{n}^{*}(\mathbf{r}_{A})\Psi_{\alpha}^{*}(\mathbf{r}_{B})V(|\mathbf{r}_{A}-\mathbf{r}_{B}|)\Psi_{n}(\mathbf{r}_{A})\Psi_{\alpha}(\mathbf{r}_{B})d^{3}r_{A}d^{3}r_{B} = \\ &= \iint |\Psi_{n}^{*}(\mathbf{r}_{A})|^{2}|\Psi_{\alpha}^{*}(\mathbf{r}_{B})|^{2}V(|\mathbf{r}_{A}-\mathbf{r}_{B}|)d^{3}r_{A}d^{3}r_{B} \approx 0 \quad (5.30) \\ & \left[ \overset{\mathbb{T}}{\mathbb{T}} \text{th} \overset{\mathbb{T}}{\mathbb{H}} \right] \underbrace{\operatorname{If}}_{\mathcal{H}} (\mathbb{I} \approx \mathbb{N} \times \mathbb{V} \times \mathbb{I} \, d, \quad \mathbb{C} \otimes \overset{\mathbb{T}}{\mathbb{H}} \otimes \mathbb{I} \otimes \mathbb{I}$$

(5.31)と(5.32)の条件が満たされる可能性を分析するためには、粒子の相互作用エネルギーの明示的な形を知る必要がある。

陽子あるいは重陽子の場合には、そのエネルギーの形は良く知られており(Davydov, 1963), 陽子 2 個と電子 2 個からなる系の場合は次のようになる。

$$V(r) = (e^2/a\rho)(1 + 5\rho/8 - 3\rho^2/4 - \rho^2/6)\exp(-2\rho), \ \rho = r/a$$

この関数のグラフを図 5.2 に示す。

2 つの電子の存在下における 2 つの陽子の相互作用エネルギーは交代座標関数であることが分かる。

媒質中での電子の存在下におけるそれより重い2つの原子核の相互作用エネルギー V(r)もまた,原子間距離の交代関数である(図 5.3 参照)。

大きな距離 $r \ge a \equiv \hbar^2 / me^2$ の場合には、そのエネルギーは事実上 $Mn^+ - e - d$ 系のイオン結合のパラメーターおよびファンデルワールス力の特性によって決定され、この

とき, V(r) <0である。

中間距離の領域a/Z < r < aにおいては、そのエネルギーはトーマス-フェルミ近似

$$V(r) = \{Ze^2/r\}\chi(rZ^{1/3}/0.885a)$$

によって特徴づけることができる。このとき、その距離区間においてはV(r) > 0とV(r) > 0の値を取ることができる。



図 5.2.d-e-e-d系中における 2 つの重陽子の間の相互作用エネルギー



図 5.3. 電子の存在下における原子核 Mn と d の相互作用エネルギーの発現構造

小さな距離の領域r < a/Zにおいては、核相互作用は原子核のクーロン斥力に相当し、  $V(r) = Ze^2/r > 0$ となる。

原子核 Mn と d の相互作用エネルギー(補償電子が存在するとき)の空間構造を図 5.3 に示す。

ー見すると、クーロン相互作用はそれ以外の相互作用よりはるかに強いのだから、  $V_{n\alpha,n\alpha} \approx 0$ という条件の確保は、 $R_{\alpha}, R_n \rightarrow \infty$ のきわめて大きいサイズを持つ井戸中においてしか達成することができないように思われる。

しかし,そのような解は(5.26),(5.27)の融合速度と融合確率の最適化をもたらさないことは明らかである。なぜなら,その場合には

$$\lambda_r \approx \Lambda |\Psi_{n,\alpha}(0)|^2 = 2\Lambda/\pi^2 R_{\max}^3 \to 0$$

となるからである。

より詳しい分析は、 $V_{n\alpha,n\alpha} \approx 0$ という条件の確保は、微視的サイズを持つ井戸の場合 にも可能であることを示している。このことは、ポテンシャルエネルギーは $V_{n\alpha,n\alpha}$ に関 する表式中に常に座標の2乗と組み合わされた形で含まれており(これは球面座標系 における積分の結果である)、その結果、V(r) > 0とV(r) > 0の2つの領域の積分に対 するポテンシャルエネルギーの寄与が完全に同等なものになっていることによっても たらされている(図 5.2 と図 5.3 参照)。

結局、それら2つの寄与が相殺し合うような井戸の最適サイズを見出すことがほぼ常に可能であり、まさにこのことが $V_{n\alpha,n\alpha} \approx 0$ という必要とされる結果を保障しているのである。

#### 5.3.3. 増殖中の生物系における無障壁核融合の進行のあり得るシナリオ

相互作用する原子核の運動と核反応の効率に対してクーロン障壁が及ぼす作用の短時間除去効果の実現に関する得られた諸条件の総体は、周囲マトリックスの最適構造を持った要素のバルク中において(例えば、直径2 $R_0 \approx 10~12$ Åの微小空孔、幅4~5Åの微小スリット、また二次元または三次元のポテンシャル井戸を創出するその他の微視的不均質体中において(Vysotskii, Kuzmin, 1990))確保されることができる。

触媒マトリックスのポテンシャル井戸のパラメーターに対する所与の要件が満たさ れたとき,常温での(加速器やトンネル効果によらない!)「無障壁」核融合の進行が 可能となる。それらの要件はかなりセンシティブであることに注目する必要がある。

例えば、ポテンシャル井戸のサイズ(半径) $R_0$ とポテンシャルレリーフの傾き  $U_{\max}/R_0^2$ が厳密に決定されなければならない。

我々の評価によれば、d-e-d系(図 5.2)にとって最適なのは $R_0 \approx 2$  Åの井戸である。Mn-d系(図 5.3)にとって最適な井戸のサイズは約 $R_0 \approx 4.5$ Åである。それらの 井戸の最適サイズは原子間距離と同等であることが分かる。このことにより、そのような井戸は、一般的な意味におけるところの閉じた井戸にはならないであろう(それらの井戸の「壁」は、原子から構成されたものにはならないであろう)。そのような井戸は、大きなサイズを持つ軸対称な井戸の中心領域において形成されるであろう。

それとともに、結晶格子のひずみの存在から生じる要因が多数存在するため、それ らのパラメーターの正確な値の計算はきわめて複雑なものとなる。微視的不均質体の 構造とサイズが所要の要件(ポテンシャルエネルギーの二次関数的なプロファイルと 最適な傾き、最適なサイズ)と偶然正確に一致する確率はきわめて小さい。

おそらくこのことが、固く固定された剛体中における常温核融合実験の効率と繰り 返し性の低さをもたらす原因となっているのであろう。常温核融合過程を最適化する ためには、微視的不均質体の既存のパラメーターの最適パラメーターへの「自動調整」 メカニズムが必要なのである。

増殖中の微生物培養物中においては常温核融合の前提条件が生じている。増殖領域 においては発育中の培養物の急速な構造的変容が生じている。サイズとポテンシャル プロファイルが経時的に変化する構造的な微視的不均質性が連続的に生じている。膜 中ではチャネルの直径と形状の適応的変化が生じている。酵素とタンパク質の相互配 置が変化しており(例えば DNA 複製過程において,また DNA ポリメラーゼその他の 酵素の作用領域におけるタンパク質合成過程において),当然,このことがその領域に おけるポテンシャルエネルギーの性格を変化させている。その他多数のダイナミック な過程が生じており,それらの各過程がポテンシャル井戸の形成と変容を引き起こし ている。それらの過程は相異なる場所で,またきわめて多数の物体中で同時に進行し ている。それらの各物体は何らかの時点に核融合と核変換の一種の触媒(すなわち, 事実上,1回のみ作用するマイクロリアクター)になる可能性を潜在的に持っている。

培養物の発育過程において、それらのポテンシャル井戸の特性サイズと形状は必然 的に(ある時間区間内に)特性最適値に近いものとなり、このことが元素の融合と変 換のための前提条件を創出する。

微視的不均質体の特性サイズRが相異なる時点に最適値R<sub>0</sub>を必然的に「通過」する そのような連続的「構築」過程は、増殖中の微生物培養物の例外なしにすべての領域 に必然的に波及する。この事情が増殖中の微生物培養物をパラジウムやチタンのほぼ 静的な結晶と原理的に異なったものにしている。それらの結晶においては微視的不均 質体の形状と量は事実上固定されており、最適条件への「自己調整」メカニズムが存 在しないからである。

微生物培養物がその中で発育する培地の組成中に変換に必要な出発同位体成分が存 在している場合には、それらの成分が最適構造を持った微小空孔に入り込むと、融合 反応が生じ、元々培地中に存在していなかった、しかし培養物のさらなる増殖に必要 な同位体が生まれる。その同位体は直ちに増殖中の培養物によって吸収され、培養物 の構造に組み込まれる。そのような過程が培養物の増殖領域全体において連続的に繰 り返される。ランダムに形成される同位体が培養物の増殖に必要のないものである場 合には、おそらく、やはりゆらぎ的な仕方で分離し、初期成分となる。

## 第6章 生物系における同位体変換過程の化学的・生物学的前提

前章では、原子核、イオンおよび分子系の相互作用のいくつかの純粋に物理学的な メカニズムが検討された。それらのメカニズムは、それらの粒子と系の量子力学的運 動の特殊性を考慮しており、最適化された力場中においては常温核反応が進行するこ とが可能であることを矛盾なく根拠づけることができる。要するに、前章では、「低エ ネルギー同位体変換反応はいかにすれば加速化し、最適化することが可能か?」とい う核物理学の基本的な問いに答える試みがなされた。その答えは量子力学の法則に立 脚しており、生物界と無生物界の任意の対象物に等しく適用することができる。

増殖中の生物培養物中における同位体変換(特に,普通の条件下においては増殖中の培養物にとって必要のない化学元素の同位体の形成を伴う変換の場合)の問題を分析すると,さらに多数の特殊な問いが生じてくる。

それらの中で最も重要な問いは、「同位体の融合・変換過程は増殖中の培養物にとって何のために必要なのか? 培養物はどこで、いかにしてそれを行うのか? その過程 を制御することは可能か?」という問いである。

これらの問いに対する完全かつ最終的な答えを出すこと――それは将来の仕事である。我々はこの問題のあらゆる複雑さを認識している。以下に述べることは、この問題に関する我々の理解にもとづく、問題解決のためのある種の概略的道筋としてのみ解釈することができる。

生物系における常温同位体変換過程の揺るぎない客観性,論理的に根拠づけられた 法則性,原理的な認識可能性という立場に立つならば,我々は,この過程が持つ大き な効率の原因の探求は,物理学,化学および生物学の既知の法則から出発して行う必 要があることに直ちに気づかなければならない。我々は,既存の知識体系の枠外に出 ることにいかなる根拠も認めない者であるが,しかし,それらの知識についてより独 立した分析をしてみよう。

#### 6.1. 生物学的対象物の元素組成と増殖中の培養物中における制御融合の問題

まず最初に,生体系の元素組成と関係する,生体系の代謝過程の一般的法則性について検討しよう。

良く知られているように、あらゆる生体系は自己安定化可能な系であり、その化学 組成は DNA に埋め込まれた遺伝コードによって決定され、一生を通じて事実上変化 しない。普通、化学元素は相対濃度による分類にもとづいて必須多量元素と必須微量 元素に区分される。

必須多量元素に分類されるのは、O(生きた培養物中における代表的濃度は約24%), H(64%), C(9%), N(0.13%)である。

生物培養物の増殖に必要とされる必須微量元素には、Na(7·10<sup>-3</sup>%)、K(4.5·10<sup>-2</sup>%)、Ca (7.5·10<sup>-2</sup>%)、Mg (2·10<sup>-2</sup>%)、Fe (8·10<sup>-4</sup>%)、P (1.3·10<sup>-2</sup>%)、Si (3.5·10<sup>-2</sup>%)が含まれる。

生物学的対象物の増殖と生存の特殊性は、さらに、一連の痕跡量の微量元素の存在を要求する。すなわち、Cl (7・10<sup>-3</sup>%)、Al (6・10<sup>-3</sup>%)、B (6・10<sup>-4</sup>%)、Ti (10<sup>-4</sup>%)、Zn (3・10<sup>-5</sup>%)、Li (10<sup>-4</sup>%)、Cu (10<sup>-5</sup>%)、Sr (10<sup>-5</sup>%)、Ba (5・10<sup>-6</sup>%)、F (3・10<sup>-5</sup>%)、Br (6・10<sup>-6</sup>%)、Rb (4・10<sup>-6</sup>%)、Sn (10<sup>-6</sup>%)、Ni (5・10<sup>-6</sup>%)、Mo (10<sup>-6</sup>%)、Co (10<sup>-6</sup>%)である。

一部の微生物培養物の場合には、さらに S, Mn, I, Hg 等の微量元素が必要とされる。 上に挙げた量は平均値であり、個々の培養物の場合ごとに何桁も異なる可能性がある。

生体中における化学元素の比は、どれだけバランスが取れ、相互に安定化されてい なければならないのか? それらの元素のうちの 1 つが存在しない場合には、何が生 じるのか?

これは無駄な問いではない。生物系における化学元素と同位体の常温変換現象それ 自体,そしてその現象の存在条件は,もし何らかの必須元素あるいは必須微量元素が 生息環境(あるいは培地)中に存在しない場合には,しかるべき前提条件が存在して いれば,その元素は変換過程において合成されることが可能であるという発見的仮定 の上に立脚している。そのようなアプローチは,事実上,それぞれの種類の生物体中 におけるすべての必須元素の比は固定化され,最適比に最大限近い状態にあり(ある いはそのような状態になろうとしており),代謝過程がその比の安定化を促進してい るということを一意的に仮定しているのである!

この根幹的問題に関する首尾一貫した研究はヴェルナツキーの画期的研究 (Vernadsky, 1987)において開始された。

生物界のすべての対象物中におけるすべての多量元素と微量元素の収支の恒常性に 関する一般的問題についてはここでは詳しく論じず(これは次章においてより詳しく 検討される),最も単純な対象物である微生物を例に取ってこの問題を検討しよう。

微生物培養物および高等植物中における金属の相互依存的代謝の解明をテーマとするスィロエシュキンの論文(Syroeshkin, 2002)においては、元素収支の恒常性が十分な説得力のある裏づけを得ている。

この論文において決定された微生物培養物 Bacillus subtilis, Mycobacterium tuberculosis および Rhodococcus rhodochrous の乾燥後の細胞中ならびにユリ科の高 等植物 Allium aflatunense の乾燥後の細胞中における各種金属の相対含有率, また同



図 6.1. 微生物培養物 Bacillus subtilis, Mycobacterium tuberculosis および Rhodococcus rhodochrous ならびに高等植物 Allium aflatunense の乾燥後の細胞中における質 量スペクトル(元素組成)とその分散

時並行的に行われた一連の実験の場合における平均値からの偏差を図 6.1 に示す。

得られたデータから、各種微量金属元素の比は当該の生物学的対象物に関しては恒常的であるが、相異なる対象物に関してはきわめて著しく異なっていることが分かる。 上記の論文(Syroeshkin, 2002)においては、培地の組成中の各種金属のうち1つの金属の濃度の意図的な著しい増大は、各種金属の比の変化をもたらさなかったことも明らかにされている。例えば、マンガンの濃度の10倍(1µg/mLから10µg/mL)への増大は、育成後の生物学的対象物の元素スペクトルを変化させなかった。質量分析計によって記録される微量元素の構成も通常とはかなり異なっている(特に、培養物中のアルミニウムまたは鉛が大量であるという点で)。このことは、伝統的に必須元素に分類されていない具体的な化学元素に対する当該の種類の生物学的対象物の個別的需要が存在していることを示している。

それだけでなく、同一の培養物中における各種微量元素の比が、培養物のライフサ イクルのある段階から別の段階への移行(相異なる生理状態間の移行)時に根本的に 変化している。

同一の Bacillus subtilis 培養物の胞子の質量スペクトルを図 6.2 に示す。その胞子は 培地に含まれるグリセリンが完全に吸収され、細胞分裂が行われるときに形成される。 そのような胞子形成を促進するため、 Bacillus subtilis 培養物の培養時間が 15 時間 (図 6.1 に示されているデータはこれに相当する)から 14 日間に延長され、この期間 にグリセリンの完全吸収がなされた。



図 6.2. 培養物 Bacillus subtilis の乾燥後の胞子の質量スペクトル

図 6.1 と図 6.2 の比較から, *Bacillus subtilis* 培養物の生理状態の変化がその微量元素の組成を著しく変化させていること(特に,培養物が銅をほぼ完全に喪失していること)が分かる。

論文(Syroeshkin, 2002)の著者らの意見によれば、それは、培養物の生理状態が変化したときに生じる細胞の膜酵素の組成(Basolo, 1971; Hughes, 1983)および中間期 膜輸送系の変化と関係している。

これらの結果は、各種微量元素の相互関係が持つ重要な性質を示している。培地の 組成を変化させることにより、培養物の増殖速度を制御することが可能になる。培地 中におけるわずか1種類の微量元素の欠如は生物学的対象物全体の発育を抑制する。

おそらく,元素組成のこの恒常性メカニズムこそが,「同位体の融合・変換過程は増 殖中の培養物にとって何のために必要なのか?」という上記において設定された問い に答えるための鍵に他ならない。

このような理解と照らし合わせて見ると、あり得る培養物増殖促進メカニズム、ま

たおそらく融合・変換過程の促進メカニズムもより明瞭になる。特に,我々が第4章 で検討した,培地にセシウムを添加したときの同位体Fe<sup>54</sup>の融合促進効果は単純な説 明を持つことができる。

鉄もセシウム(あるいはセシウムの生化学的アナログのうちの1つ)も必須微量元 素に含まれているが、それらの最適濃度はかなりセンシティブな条件によって束縛さ れている。それら両方の成分の欠如(または低濃度)は培養物の増殖を制限する。

増殖中の培養物中において、リンとナトリウムの核変換効果にもとづいた具体的な 鉄同位体の核融合のためのすべての条件が創出されていると仮定しよう。(セシウム が存在しない状態での)鉄のみの融合は、融合される原子核の代謝過程への引き入れ を生じさせない。上記 [第4章]において検討した、最適ポテンシャル井戸中における クーロン障壁の作用に対する動的抑制効果にもとづいた核融合過程は、不可逆的な緩 和過程が生じるまでの小さい時間区間においては原理的に可逆的である。この事情が、 融合された鉄原子核が崩壊して出発成分(リンとナトリウム)に逆戻りする経路を開 いたままにする。

セシウムの添加は、融合される鉄Fe<sup>54</sup>が直ちに代謝過程に引き入れられ、融合が行われていたポテンシャル井戸中における新たな原子間電子結合の急速な形成に参加するようになり、したがってそのことがその井戸の構造を変化させるという結果をもたらす。ポテンシャル井戸の構造の再構成に要する特性「電子時間」、すなわち $\tau \approx \hbar^3/m_e e^4 \approx 10^{-17}$  sは、凝縮媒質中における重イオンのデバイ振動周期の大きさ $T \approx 10^{-13}$  sとオーダーが等しいので、逆戻りの崩壊は不可能となる。その結果、融合される鉄は電子結合によって増殖中の培養物に組み込まれ、それによって培養物中に固定される。

#### 6.2. 微生物と金属の相互作用の特殊性

生物体中における代謝とすべての生化学過程は何らかの形でイオンの相互作用と関係している。変換過程自体もそのような相互作用に立脚していることは明らかである。 本節では、微生物培養物と各種金属イオンの相互作用の特殊性が検討される。金属に とってイオン形成過程は最も自然な過程である。以下において、我々は「金属」とい う概念のもとで、陽イオン、陰イオン、錯体、酸化物および水酸化物の形の酸化形態 の金属を意味することにする。本節のデータはかなりの程度までタシレフの概説論文 (Tashirey, 1995)にもとづいている。

まず最初に,同位体の核変換を促進する能力を潜在的に持っている諸過程を見出し, 具体的に捉えることを念頭において相互作用過程の一般的分類を行おう。

文献(Iske, 1989; Silver, 1984)においては、金属イオンと微生物の相互作用は次の 諸過程において発現している可能性があることが示されている。

1) 動員 [mobilization] (金属の不溶性形態から可溶性形態への移行)

- 2) 固定 [demobilization] (可溶性金属化合物からの不溶性沈殿物の形成)
- 3) 蓄積(細胞表面における金属の吸収または細胞内部における金属の集積)
- 4) 揮発性金属化合物の形成

上記の4つの過程のそれぞれの基礎には、まったく相異なるメカニズムが横たわっている可能性がある。

特に、微生物がHg<sup>2+</sup>と相互作用すると、揮発性化合物が金属水銀Hg<sup>0</sup>の形で(Tezuka, 1976)、またはHg<sup>2+</sup>のメチル誘導体であるモノメチル水銀とジメチル水銀の形で(Pan-Hou Hidemitsu, 1982)形成される可能性がある。金属水銀も、またそのメチル誘導体

も水溶液から揮発する。しかし、前者の場合には金属の還元反応 $Hg^{2+} + 2e = Hg^0$ が生じるのに対し、後者の場合には酸化数の変化を伴わないメチル基の陽イオン $Hg^{2+}$ への結合反応が生じる。すなわち、

 $\mathrm{Hg}^{2+} + \mathrm{CH}_3 = \mathrm{Hg}^{2+}\mathrm{CH}_3$ 

 $Hg^{2+}CH_3 + CH_3 = (CH_3)_2Hg^{2+}$ 

金属の固定は微生物によって代謝物質との相互作用または金属の還元反応の経路に よって行われる可能性がある。例えば、硫酸塩還元菌は硫化水素を遊離させ、その硫 化水素が多数の金属との間で不溶性沈殿物を形成する。7 に近い pH のときに高い可 溶性を持つクロム酸塩と相互作用すると、その還元反応が生じ、水酸化クロムが形成 される。

それと同時に,各種の金属において,同一の過程がまったく相異なる結果を持つ可 能性がある。

例えば、細菌の細胞内において亜テルル酸塩が還元されると金属テルル結晶が形成 されるが、水銀の還元反応は揮発性金属水銀の形成をもたらす。いずれの場合にも還 元反応が生じているが、結果は異なり、前者の場合は金属の蓄積が、後者の場合は揮 発性化合物の形成がもたらされている。

上記の4つの過程のうち,最初の3つの微生物と金属の相互作用過程についてより 詳しく検討しよう。

1)金属の動員 不溶性酸化金属化合物の動員は、主として微生物による媒質のpH 低下と有機化合物の酸化によって生じ、また、微生物によって化合物が遊離され、そ の化合物が金属との間で有機ミネラル錯体――キレート――を形成するという経路に よって生じる。培地のpH が pH 3~4 まで低下すると、大部分の金属は可溶性の形態 に移行する。キレートの特殊性は、それらがきわめて幅広い範囲の pH 値の媒質中に 存在することが可能であることである。陽イオンTi<sup>3+</sup>は既に pH 2~2.5 で沈殿し始める (水酸化チタン)のに対し、溶液にキレート剤(クエン酸塩)を添加すると、強アル カリ性(pH 9~10)の溶液中においてさえ、チタンはクエン酸チタンの形で安定した 状態を保つ。

微生物の事実上あらゆる外因性代謝物[exometabolite] — ビタミン, 酵素, 抗生物質,
 フミン酸(Rohde, 1963), フミン様重合体(メラニン)(Senesi, 1987)および有機酸
 (Callander, 1983) — が金属のキレート剤としての役割を果たすことができる。

金属の動員が最も効率的に生じるのは、嫌気条件下において炭水化物と多糖類(天 然重合体)が発酵するときである。これは、金属の急速な溶解を促進する2つの要因 の組み合わせと関係している。第1の要因は、基質が酸化すると、培地のpHが3~4 まで低下することである。第2の要因は、主な最終発酵産物(有機酸)が強力なキレ ート剤であることである。全体的に見ると、キレート化は金属の酸化化合物の自然条 件下における溶解度を4桁上昇させることができる(Callander, 1983)。

金属が可溶性形態に移行すると、金属は細胞にとって利用可能なものとなり、微生 物代謝過程に引き入れられる。上記において指摘したように、その過程は固定、蓄積 あるいは揮発性金属化合物の形成をもたらすことが可能である。

あるきわめて重要な事実に注目しよう。微生物と相互作用したとき、その酸化形態 が可溶性形態に移行しないような金属が存在するというデータは文献には存在しない のである! 動員は、それ自体としては核変換をもたらさないにもかかわらず、微生物 代謝を促進し、元素・同位体変換の間接的触媒として立ち現れる可能性がある。

2) 金属の固定 微生物による可溶性金属の沈殿が最もしばしば観測されるのは,極

限還元状態にある硫黄を含有する有機化合物(例えばシステイン,メチオニン)が異 化型硫酸塩還元または分解されたときに形成される,生物由来硫化水素と反応したと きである。第1族元素の主要亜族に属する1価アルカリ金属(リチウム,ナトリウム, カリウムその他の陽イオン)および第2族の一部の陽イオン(カルシウム,マグネシ ウム)を除き,それ以外のすべての金属は,圧倒的大部分の場合において事実上不溶 性の金属硫化物を形成する。通常,金属を沈殿させるためには,硫化物産生源が細胞 と直接接触することは必要とされない(Ilyaletdinov,1982)。しかし,この過程はしば しば細胞質中への金属陽イオンの輸送およびそれに続く細胞内での硫化物の形成と組 み合わされている(Jones,1976)。例えば,いくつかの代表的微生物(*Desulfovibrio*お よび *Desulfotomaculum*の培養物)は細胞内において鉄を硫化物の形で活発に集積す る。

金属はタンパク質と相互作用したときにも固定され、強固な不溶性錯体を形成する ことができる(Weege, 1989)。そのような相互作用が最も特徴的に見られるのは銅の 場合である。事実上すべての従属栄養微生物によって形成される炭酸ガスCO<sub>2</sub>はカド ミウムと鉛の不溶性化合物(CdCO<sub>3</sub>, PbCO<sub>3</sub>)の形成をもたらすことができる(Babich, 1979)。鉛その他の金属はコハク酸との間で不溶性化合物を形成することができる

(Aickin, 1979)。さらに,金属は過酸化物と相互作用したときにも固定される可能性 がある(Wood, 1983)。

3)金属の蓄積 微生物は細胞の表面上または内部に堆積する方法で金属を蓄積する。そのような蓄積の結果,微生物バイオマス中における金属の濃度は周囲媒質中の 濃度より数桁高くなることがある。例えば,微生物による海水からの金属抽出係数は 次の数値によって決定される:カドミウム-910,コバルト-4600,銅-7000,鉄-87000,鉛-41000,マンガン-94000,チタン-20000,亜鉛-65000(Bowen,1966)。 いくつかの種類の嫌気性微生物によるニッケル抽出係数は 3000 である(Lundie, 1988)。

微生物による金属蓄積は水溶液中における金属濃度が低いときだけでなく、きわめ て高いときにも生じる。例えば、*Thiobacillus ferrooxidans* ATCC 19859 培養物は銅お よび亜鉛陽イオンのきわめて高い濃度(それぞれ 30 g/L および 40 g/L)の下で増殖 し、それらの金属を蓄積する能力を持っている(Brahmaprakash, 1988)。

微生物細胞によって結合された金属の濃度は、最も多くの場合、細胞乾燥質量 1g 当たり数十 mg の範囲内にある。しかし、その値はときには 1g 当たり数百 mg に達す ることがある。*Escherichia coli* 細胞は細胞乾燥物質 1g 当たり 16 mg の濃度の亜鉛を 蓄積し、*Pseudomonas cepacia* 細胞はそれぞれ 77 mg/g および 53 mg/g の濃度のカド ミウムおよび鉛を吸収することができる(Drapeau, 1983)。金属の作用に対して耐性 を持つ微生物は、それらの金属の高い蓄積能力を発揮する。*Alcaligenes eutrophus* CH 34 は 130~150 μg/g のカドミウムを吸収し(Diels, 1987)、*Pseudomonas sp*.菌株は 200 mg/g 以下の銀を吸収する(Glombitza, 1988)。

同一の種類の菌株は、元素周期表の相異なる族に属する金属を効率的に蓄積する能力を持っている。例えば、*Rhodotorula glutinis* はマンガン、鉄、銅、亜鉛、カドミウム、鉛、ベリリウムおよびクロムといった互いに似ていない金属を高い濃度で蓄積する(Drapeau, 1983)。それと同時に、同一の種類の金属は相異なる分類群に属する代表的な微生物によって蓄積されることができる。例えば、カドミウムは緑色微細藻類(Sakaguchi, 1979)、菌類(Gadd, 1853) およびシュードモナス属菌(Kurek, 1989)に

よって吸収される。

微生物による金属蓄積のそのような明確な非特異性は、微生物と金属の物理・化学 的相互作用メカニズムが卓越していることを示している。 大部分の場合,金属蓄積は細胞表面上に堆積する方法で生じる。金属は莢膜多糖体 によって結合し合うことが可能であり(Scott, 1988),そのとき,莢膜内において複数 の種類の金属が同時に蓄積されることが可能である。例えば, Bacillus megaterium ATCC 19213 は大きな莢膜を形成し,その内部に銅,水銀,鉄,亜鉛およびマンガンの 陽イオンを蓄積する(Cassity, 1984)。

細胞表面上における金属蓄積は、金属と細胞膜タンパク質の錯体が形成される結果 生じることができる。例えば、*Mycoplasma capricolum* は細胞膜内にタンパク質との 錯体の形で局在化される鉄を蓄積する(Bauminger, 1980)。

多数の金属が細胞表面上においてPbHPO<sub>4</sub> (Aickin, 1979), CdHPO<sub>4</sub> (Macaskie, 1987), Au<sup>0</sup>およびPd(OH)<sub>2</sub> (Beveridge, 1978), 金属硫化物等々といった不溶性化合物を形成 する。細胞表面上における不溶性化合物の形成は, ときには酵素の活性と関係してい ることがある。例えば, リン酸カドミウムの形成は, グリセロール 2-リン酸によって 誘導され, HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の形成を伴うグリセロール 2-リン酸の分割を触媒するフォスファタ ーゼの活性と共役している。この陰イオンHPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>はCd<sup>2+</sup>と相互作用し, 細胞と結合し た不溶性のCdHPO<sub>4</sub>を形成する (Macaskie, 1987)。

微生物の表面による金属蓄積は、細胞壁構造体による結合という方法によっても行われる(Beveridge, 1978, 1982)。

金属は細胞の表面構造体によって結合されるだけでなく、細胞内に集積されること もある。カドミウム(Gadd, 1983)、コバルト(Belov, 1985)、銀(Glombitza, 1988)、 亜鉛(Kasan, 1988)その他一連の金属の細胞内集積に関するデータが存在する。細胞 内における金属集積が輸送系の機能と関係していることは明らかであり、そのとき、 金属の抽出には能動輸送系と受動輸送系の両方が関与している可能性がある

(Laddaga, 1985)。金属は細胞内に浸透した後、細胞質タンパク質および細胞内膜構造体と結合するか、または細胞内で不溶生産物を形成する可能性がある(Laube, 1980)。

細胞内における不溶性金属化合物の形成は,まったく相異なる複数のメカニズムに 従って行われる可能性がある。例えば,テルルの酸化化合物は細胞内で変換され,還 元反応経路

 $TeO_3^{2-} + 3H_2O + 4e = Te^0 + 6OH^-$ 

に従って元素テルルが形成される(Gordzhyan, 1970)。

カドミウムと鉄は硫酸塩還元菌の細胞内において当該の硫化物を形成する (Jones, 1989)。マンガンは細胞質中において不溶性の結晶性ヒドロリン酸塩MnHPO<sub>4</sub>を形成する可能性がある (Kihn, 1988)。

大部分の場合,微生物の金属蓄積は明確な空間的局在化を持っているにもかかわらず,ときには金属が同時に相異なる場所(例えば細胞壁内,細胞膜画分中および細胞 質画分中)に分布していることがある(Kihn, 1988)。

我々の意見によれば、蓄積過程は変換現象に直接関与している可能性がある。この 事情は、上記において既に考察したように、核の融合と変換が進行するためにはいく つかの必須条件が満たされる必要があるということと関係している。それらの条件の 1 つは、融合される同位体は最大限急速に代謝過程に引き込まれ、それに伴って安定 核(安定原子)として固定されなければならないということと関係している。蓄積過 程を促進する生化学過程が、それと同時に常温核変換を促進することは明らかである。

### 6.3. 微生物と金属の相互作用の生物学的意味

微生物と金属の相互作用の生物学的意味は、3 つの主要特性――金属の濃度、金属

の毒性レベルおよび微生物の代謝ポテンシャル――によって決定される。

生物系の任意の元素に関して、その生物系の代謝と生命活動に対する影響の度合い という点で根本的に相異なる、当該元素の濃度の3つのレベルを決定することができ る。

1) 促進作用(その金属は細胞の正常な代謝の維持にとって不可欠であるので,輸送 系によって周囲媒質から能動的に吸収される)。

2) 適度な抑制作用(その金属が多量に存在し,代謝を抑制しているため,細胞においてその金属の好ましくない作用を相殺するための防御機構が発動する)。

3)殺菌作用(その金属が致死量存在し,細胞の発育を不可逆的に抑制している)。 この影響が持つ特徴の例証を銅イオンを例に取って行うことができる。

銅はメチロトローフ細菌の青色銅タンパク質の組成――アミシアニンとアズリン― ーに含まれていることが知られている。アミシアニンとアズリンはメチルアミンデヒ ドロゲナーゼからの一次電子受容体の役割を果たし,電子をシトクロムC<sub>H</sub>およびC<sub>L</sub>に 伝達する(Lawton, 1985; Tobari, 1983)。

大部分の微生物にとって、銅の促進的濃度は 0.1~0.2 mM [millimolar] の範囲内にあ り、銅はまさにこの狭い濃度範囲内において、銅含有電子伝達体が効率的に機能する ためにメチロトローフ細菌の細胞にとって必要とされる。

銅濃度が 0.5~0.8 mM に上昇すると,銅の抑制的性質が発現する。銅が及ぼす傷害 作用は多様である。その傷害作用は細胞内における代謝過程がブロックされたときに 発現する (Towiner, 1976)。代謝過程のブロックが生じるのは,例えば,呼吸鎖におけ る電子輸送が抑制されたとき (Smith, 1980);解糖およびトリカルボン酸回路がブロ ックされたとき (Domek Matthew, 1987);細胞質膜の膜電位が変化し,それに続いて 自分自身の電場によって膜の絶縁破壊が生じたとき (Lebedev, 1989);銅と細胞のト リオール含有成分との反応時に過酸化ラジカルが形成されたとき (Naiki, 1980)であ る。銅の傷害作用に対する応答として,細胞は莢膜多糖;銅陽イオンの余剰部分を結 合する低分子タンパク質;過酸化ラジカルを分解するスーパーオキシドジスムター ゼ (Naiki, 1980)を合成するとともに,細胞質膜の構造を変化させることによって周 囲媒質からの銅の吸収速度を低下させる (Gadd, 1984) ことができる。

銅濃度の 1~2 mM までのさらなる上昇は,数分間に生細胞数を 60%減少させた後, 培養物の全滅をもたらす (Jones, 1989)。

このように,有毒金属の1つとみなされている銅は,媒質中におけるその濃度の違いに応じて,微生物に対して促進作用,適度な抑制作用および殺菌作用を及ぼすことが可能である。

細胞内における金属のどの種類の転換も、効率的な輸送系が存在する場合にのみ生 じることができる。細胞内には「生体外異物」であるすべての金属のための輸送経路 が存在すると期待するのはナイーブなことである。各種金属のイオンは、いったいい かにして細胞内に入り込むのであろうか?

それらのイオンの大部分は、細胞の正常な生命活動過程にとって不可欠な、イオン 交換に能動的に関与するイオン(Ca<sup>2+</sup>,Na<sup>+</sup>,K<sup>+</sup>等)の立体化学的アナログである。その ような類似性の結果、、「生体外異物」金属は「他者」の輸送系と能動的に相互作用し、 それを利用する。例えば、第6族元素の酸化物イオン(モリブデン酸塩、クロム酸塩、 セレン酸塩およびタングステン酸塩)は、硫酸塩との立体化学的類似性の結果、酵素 と輸送系をめぐって硫酸塩と競合する(Tezuka,1976)。Co<sup>2+</sup>イオンとCu<sup>2+</sup>イオンとは、 微生物細胞中への亜鉛輸送系をめぐって競合する(Kasparova,1989; Macaskie,1987)。

以前には生物圏内に著しい濃度では存在していなかった元素に対する微生物の適応 度が増大するにつれて,例えば炭素,硫黄,窒素といった必須元素の循環に類似した 閉じた循環の形成も含め、それらの元素を生物学的過程により完全に引き入れるという傾向が観測される。

その典型的な例として特に挙げられるのはセレンである。自然条件下において、微 生物はセレンのすべての種類の変換を行っている(Doran, 1982; Oremland, 1986)。す なわち、微生物は

a)無機セレン化合物の酸化還元反応を促進している。

b) 有機セレン化合物の微生物細胞内における固定と生体鉱物化を行っている。

c) 有機および無機セレン化合物のメチル化と脱メチル化を行っている。

このことにもとづいて考えると、セレンを生体外異物あるいは有毒元素とみなすこ とは困難である!

多数の有毒金属に関しても、それに類似した微生物の適応が生じている。

それと同時に、金属その他の有毒元素に対する特異的防御系を持たない微生物は、 それらの元素と相互作用し、還元反応によって単純な形態を形成している。例えば、 *Micrococcus lactilyticus*(*Veillonella alcalescens*)の細胞ホモジェネートはマンガン、鉄 および銅の酸化化合物を還元する。これは驚くべきことではない。なぜなら、これら の金属は微生物の代謝にとって必須のものに分類されているからである。驚くべきな のは、それらの微生物が、ヒ素、ビスマス、セレン、テルル、鉛、タリウム、バナジ ウム、モリブデン、オスミウム、ルテニウム、金、銀、ウランといった超有毒元素の 酸化化合物をそれらと同じほど効率的に還元し、しかもこれらの元素の多くが自由元 素になるまで還元されている(Woolfolk, 1966)ことである。「微生物培養物の世界」 では、毒性という概念はその本来の一義的な意味を完全に失いつつあるのである!

このように、金属は、きわめて有毒な金属も含め、微生物にとって「悲劇的な」結 果を生じることなく代謝過程に引き込まれることが可能なのである。微生物と金属の 相互作用は、その最終的な結果という点では、動員(可溶形態への金属の移行)、ある いは逆に「固定-蓄積」(非可溶形態の金属の移行または細胞による金属の結合)とい う形で発現する。

上に挙げた代謝の特殊性は放射性核種に対しても完全に当てはまる。放射性核種は 非放射性金属と同様に生物由来の硫酸塩還元時に金属硫化物を形成する。この場合, 放射性核種は,何よりもまず,非放射性金属と同じメカニズムに従って微生物との相 互作用に入る元素として検討する必要がある。長寿命放射性核種は生化学的には安定 核種とまったく異ならない。その作用の特異性は,通常多数のフリーラジカルの形成 を伴う水の放射線分解の段階を通過する,一次放射線生物学的過程のレベルにおいて 発現する。このことは,疑いもなく,毒素と放射性核種の作用の(一次放射線生物学 的過程に関する)部分的な同一性をもたらす。これらの作用の間における本質的な差 異は,疑いもなく,生態系の生命活動のより高い(より系統的な)組織化レベルにお いてのみ発現する。この事情が,微生物放射線工学において微生物を徹底的に利用す ることを可能にする。

#### 6.4. 必須微量元素の生化学的アナログ. 微生物の代謝と制御変換の問題

こうして,上記において設定した「同位体の融合・変換過程は増殖中の培養物にとって何のために必要なのか?」という問いに対し,単純な,そしておそらく最終的な 答えを与えることが可能となった。その答えは,「同位体の融合・変換過程は,標準的 な比率に達していない化学元素を補充するために客観的に必要とされている」である。 しかし,それに続く「微生物系はどこで,いかにしてそれを行うのか?」という問い
## 73 第6章 生物系における同位体変換過程の化学的・生物学的前提

に答えるためには、具体的な相互作用メカニズムを検討する必要がある。

既に 1930 年代, ヴェルナツキーは生物体は化学元素を濃縮しているという意見を 述べていた(Vernadsky, 1987)。この現象の基礎には, 何よりもまず, 生物圏内に拡散 している「多量元素」と「少量元素」(ヴェルナツキーの用語による)が横たわってい る可能性がある。

上述した核融合の確率に対するクーロン障壁の作用の動的な短時間「除去」モデル は量子過程に立脚しており、それらの過程においては、サイズが最適化された量子ポ テンシャル井戸(それらのサイズは相互作用する各タイプの粒子ごとに厳密に個別的 なサイズである)が支配的役割を演じている。我々の物理モデルは現実の物理的ある いは生化学的過程の理想化である。

発想という点で筆者らにきわめて近いのは、タシレフ(Tashirev, 1994, 1995)の研究において展開されている微生物と金属の相互作用に関する構想である。この構想もサイズ効果に立脚しており、次の命題を含んでいる。

1. 各金属は、微生物の代謝においてありふれた成分となっている、培養物の必須微量元素および培養物に適合した微量元素(K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub>等)の中に、酸化還元および(または)立体化学の点での自分のアナログを持っている。酸化還元の点での類似性(レドックス類似性 [redox analogy])は金属と多量元素の還元反応がレドックス電位に近いかまたは相等しいこと、また立体化学的類似性は金属と多量元素のイオン半径が近いかまたは相等しいことを暗示している。

2. 微生物と金属の相互作用の非特異性は、立体化学的類似性とレドックス類似性から生じる結果である。微生物細胞の受容系、輸送系および酸化還元系は、金属と多量元素のイオン半径の大きさまたはレドックス電位の近似性によって「錯誤」を犯し、 それゆえ金属は微生物によって蓄積され、または還元される(そしてしばしばそれに伴って非水溶性化合物が形成される)。一連の金属は微生物によって蓄積され、かつ還元されることができる。

3. 上記諸過程の非特異性の結果, それらの金属に適応していない微生物はそれらと 相互作用しなければならなくなる。

上記の研究(Tashirev, 1994, 1995)においては、微生物による金属蓄積に関する文献データの一般化が行われ、金属の多量元素との立体化学的類似性による微生物細胞中における金属蓄積の理論的法則性が定式化されている。

立体化学的類似性は、金属と多量元素のイオン半径の近似性または相等性を暗示し ている。立体化学的類似性の結果、微生物は金属と相互作用する。微生物細胞の受容 系と輸送系は金属と多量元素のイオン半径の大きさまたはレドックス電位の相等性ま たは近似性によって「錯誤」を犯し、それゆえ、金属は微生物細胞によって非特異的 に蓄積される(ここで「非特異的」という言葉で意味されているのは、金属がそれに 適応していない微生物によって蓄積されるということである)。

多量元素およびその他の金属の陽イオンのイオン半径(Lur'e, 1979)を表 6.1 に示 す。この表において、「多量元素」Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sup>4</sup>, Fe<sup>3+</sup>およびNa<sup>+</sup>に関するデー タは上の2行に配置されている。それ以外の金属は元素周期表の族へのその帰属に従 って配置されている。各陽イオンの水平方向の棒の長さは、相異なる著者のデータの ばらつきを示している。このばらつきはイオン半径の測定方法の違いに起因している。

例えば,  $Cu^{2+}$ のイオン半径は Belov と Bokiy によれば 0.080 nm であるが, 別のデー タによれば 0.072 nm と 0.082 nm である。 $Zn^{2+}$ の半径は Goldschmidt, Pauling および Belov と Bokiy によればそれぞれ 0.083 nm, 0.074 nm および 0.083 nm である。その 結果,  $Cu^{2+}$ のイオン半径は座標 0.072~0.082 nm の線で,  $Zn^{2+}$ の半径は 0.074~0.083 nm の線で描かれている。これらの元素のイオン半径の値は、これら 2 つのイオンを

	0,00	0,02	0,04	0,0	06	0,0	08	0,1	0	0,1	2	0,14		0,16	£
多量	元素				M	5 <sup>3+</sup>			Cal+			K*	NH	r.	
-					Fe <sup>3+</sup>	F	e <sup>2+</sup>	Nat							
	1					U?	A			_	<b>s</b> <sup>+</sup>	Au+	Rh	*	Cs+
						C	u <sup>2+</sup>	9	¥*					1	-
			Be1*			Z	n <sup>2+</sup>		Cd <sup>P+</sup>	S	r <sup>2+</sup>	Ba	2+	1	
										Hg2*			Ra	24	
		B2+		AP*	Ga3+		Sc3+		Y9+					1	
		T T		-	n		h	134		F	ln°			1	
	m				111	11		4	L	a <sup>3+</sup>				1	-
				-	ttt	Par	* Pu <sup>s</sup> *	Pu**	TI2+	Ac3+			<b>TI</b> *	1	-
					111	TT		П	Pu <sup>2+</sup>	T				1	
					Tr**	71-	Ti2+		T					1	
	IV		T.	Ge4+	Ge2+	I	Zre	S	2. 1	h3+	P	b3+		+	
				1	S	1 <sup>44</sup>	Hre		Th?*	I	1			T	
			1	15+ 1	144	P	+ ¥2+	Sb <sup>2+</sup>					1	1	
	v			Sb <sup>4</sup>	* N65+	Nbe	P		P	2 <sup>3+</sup>	1			1	
趆					Th <sup>3+</sup>	B/#+		Patt		B	P+		1	1	1
素の				Te**	Ci <sup>24</sup>	Set	Crat				T			1	-
iκ	VI			V	4+ P		Ter							1	1
					M	04+								1	1
				Ma**	M	n3+	M	ln <sup>3+</sup>	T					1	
	VII -			R	64	Ret								1	
					Cor	C	02+							1	1
				N	117	Ni			T			1		1	1
				Rust	Ra4*	B	u <sup>3+</sup>							1	1
	1000			-	R	h*1	P	42-	T	$\vdash$		1		1	
	VIII			-	Pat	Rh <sup>3</sup>	T		T	1			-	1	t
					R	I.e.e	P(2+	11	T	$\vdash$	1			-	
				Ir**	1	1	3+	lr <sup>3+</sup>			1	1		+	-
				Os#	0	844	Ost	Q524	+	-	1	1	1	1	1

表 6.1. 金属の立体化学的類似性

Fe<sup>2+</sup>の立体化学的アナログに,またそれより小さい度合いでMg<sup>2+</sup>の立体化学的アナログに分類する根拠を根拠を与えている。

また、「立体化学的類似性」の原理にもとづいた元素の相互代替の可能性を最大限持 っているのは、同一の電荷(同一のイオン価)と同一のイオン半径を持っているイオ ンであることは明らかである。電荷が(互いに近いとは言え)相異なっている場合で も、イオン半径の同一性はそれでもやはり一定程度の立体化学的類似性をもたらす。 ただし、その類似性の発現の度合いはより小さい。

相異なる元素のイオンのイオン半径別の分布の分析は、あり得る様々な分類のうちの1つを行うことを可能にする。各種の多量元素の中では、互いに近いイオン半径を持ち、立体化学的類似性の3つの「ゾーン」を形成している3つのイオングループが明確に区分される。

第 1 グループにはFe<sup>3+</sup>, Mg<sup>2+</sup>およびFe<sup>2+</sup>が含まれる。これらはイオン半径 0.06~ 0.083 nm の立体化学的類似性の**第 1 ゾーン**を形成している。Na<sup>+</sup>とCa<sup>2+</sup>は第 2 グルー プを形成している(**第 2 ゾーン**: 0.095~0.106 nm)。第 3 グループはK<sup>+</sup>とNH<sub>4</sub><sup>+</sup>によっ て代表される(**第 3 ゾーン**: 0.133~0.159 nm)。

表 6.1 から,事実上すべての金属(Be<sup>2+</sup>を除く)は多量元素の立体化学的アナログであることが分かる。

最も多くの種類の陽イオンは立体化学的類似性の第 1 ゾーン(Fe<sup>3+</sup>, Mg<sup>2+</sup>および Fe<sup>2+</sup>)に存在している。例えば、これらの多量元素と 47 種類の金属陽イオンのサイズ は完全に一致している。さらに 17 種類の金属陽イオンがこのゾーンにきわめて近い 所に位置している。このように、立体化学的類似性の第1ゾーンに含まれる多量元素 は、サイズの点で元素周期表の7つの族に属する 64 種類の元素の陽イオンに近い。

第2ゾーン(Na<sup>+</sup>とCa<sup>2+</sup>)には11種類の陽イオンが直接含まれ,さらに9種類の陽 イオンがこのゾーンに近い所に位置している。第3ゾーン(K<sup>+</sup>とNH<sup>+</sup><sub>4</sub>)には5種類の 金属陽イオンが含まれ,7種類の金属陽イオンがこのゾーンに近い所に位置している。

いくつかの陽イオンはこれらの3つのゾーンの間の中間的位置を占めている。例えば、 $Sr^{2+}$ は第2グループと第3グループの間にあり、 $Cs^{+}$ は第3ゾーンの右側にある。 しかし、 $Ca^{2+}$ と $Sr^{2+}$  (Borst-Pauwels, 1986; Wilkens, 1989) およびK<sup>+</sup>と $Cs^{+}$  (Bossemeyer, 1989) はそれぞれの共通の輸送系を持っていることが知られている。したがって、立 体化学的類似性はイオンのサイズがかなり大きく異なっている場合でさえも発現して いる。

それとともに、微生物の輸送系をめぐる最大の競合が、相異なるまたは互いに近い イオン半径を持つイオンの間において観測されることは明らかである(Norris, 1977)。

事実上すべての金属は立体化学的アナログを持っていることを単純な分析は示して いる。この事実が、きわめて多様な同位体と元素の幅広いスケールの変換に至る実際 の経路を開いている。

微生物による非特異的な金属蓄積について予想を行う際は、実際の水溶液中における酸化形態の金属の物理的・化学的存在条件を考慮する必要がある。圧倒的多数の金属(表 6.1 参照)は、陽イオンの形態では酸性環境中においてのみ安定的であり、pH が中性のときは別の形態に移行する。

例えば、中性に近い pH のとき、Ti<sup>3+</sup>は不溶性水酸化物Ti(OH)<sub>3</sub>を形成し、Cr<sup>6+</sup>はCrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の形態に移行する、またCu<sup>2+</sup>はpH > 3のときCu(OH)<sub>2</sub>に移行する、等々といった例が挙げられる。しかし、微生物が酸性溶液中において金属と相互作用する場合には、表 6.1 に示した陽イオンの立体化学的類似性が生じなければならない。

一部の金属 ( $Zn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cs^+$ ,  $Sr^{2+}$ ) は陽イオンの形態では中性溶液中と弱ア ルカリ性溶液中において安定的である。Cr(VI), Mo(VI), W(VI)といった金属は中性溶 液中では陰イオン形態に移行する。しかし、それらは陰イオンの形態においても多量 元素の中に自分の立体化学的アナログを持っている(表 6.2)。例えば陰イオン $CrO_4^2$ -のイオン半径はそれに対応する $PO_4^3$ -のイオン半径と等しく、 $SO_4^2$ -のイオン半径にきわ めて近い。

多量元素との立体化学的類似性による微生物による非特異的金属輸送に関する理論 的予想は実験データによって裏づけられている。

陰イオン	イオン半径, nm	陰イオン	イオン半径, nm
NO <sub>3</sub>	0.189~0.257	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.295
SO <sup>-</sup>	0.200	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.300
HSO <sub>4</sub>	0.206	$CrO_4^{2-}$	0.300
$CIO_4^-$	0.236	$MoO_{4}^{2-}$	0.345

表 6.2. いくつかの陰イオンのイオン半径

微生物と立体化学的アナログ金属の相互作用に関するデータを表 6.3 に示す。

表 6.3. 微生物と多量元素およびそれらの立体化学的アナログの相互作用

立体化学的アナログ			生物玄における		
多量元素	アナログ 金属	微生物	相互作用のタイプ	出典	
K+	Rb <sup>+</sup>	Blastocladiella	細胞中への共通のイ	Kropf, Harold,	
		emersonii	オン輸送系	1982	
K+	Rb <sup>+</sup> , Ba <sup>2+</sup>	B. emersonii	細胞中への共通のイ	Van Brunt,	
			オン輸送系	1982	
K+	Rb <sup>+</sup> , Cs <sup>+</sup>	Escherichia coli	細胞中への共通のイ	Bossemeyer,	
			オン輸送系	1989	
K+	Rb <sup>+</sup>	Anabaena	細胞中への共通のイ	Reed, 1981	
		variabilis	オン輸送系		
K+	Rb <sup>+</sup>	Saccharomyces	細胞中への共通のイ	Rodriguez-	
		cerevisiae	オン輸送系	Navarro, 1984	
Mg <sup>2+</sup>	Co <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup>	Klebsiella	細胞中への共通のイ	Ainsworth,	
		pneumoniae	オン輸送系	1980	
Mg <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup>	Bacillus subtilis	細胞中への共通のイ	Burke, 1986	
			オン輸送系		
Mg <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup>	Escherichia coli	Co <sup>2+</sup> が細胞中への	Laddaga, 1985	
			Mn <sup>2+</sup> 輸送を抑制		
Fe <sup>2+</sup>	Co <sup>2+</sup>	Acidophilium sp.	細胞中へのイオン輸	Dou, 1989	
			送系をめぐる競合		
Ca <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	Saccharomyces	細胞中への共通のイ	Borst-	
		cerevisiae	オン輸送系	Pauwels, 1986	
Ca <sup>2+</sup>	$Zn^{2+}$ , $Cd^{2+}$	Escherichia coli	Zn <sup>2+</sup> が細胞中への	Sakaguchi,	
			Cd <sup>2+</sup> 輸送を活性化	1981	
Ca <sup>2+</sup>	$Zn^{2+}, Co^{2+},$	Candida utilis	細胞中への共通のイ	Kasparova,	
	Mn <sup>2+</sup>		オン輸送系; Zn <sup>2+</sup> が	1989	
			細胞中へのCo <sup>2+</sup> 輸送		
			を抑制		
Ca <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup>	B. subtilis	細胞中への共通のイ	Laddaga, 1985	
			オン輸送系		

77	第6章	生物系における同位体変換過程の化学的・	·生物学的前提

Ca <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup>	Debariomyces hansenii	細胞壁内の金属の 結合中心をめぐる 競合	Wakatsuki, 1970
Fe <sup>2+</sup>	Co <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup>	B. brevis	Fe <sup>2+</sup> とCo <sup>2+</sup> が細胞 中へのMn <sup>2+</sup> 輸送を 抑制	Jack, 1979
Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup>	B. subtilis	Fe <sup>2+</sup> とCo <sup>2+</sup> が細胞 中へのCd <sup>2+</sup> 輸送を 抑制	Burke, 1988
Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup> H, Cd <sup>2+</sup>	<i>Staphylococcus aureus</i>	細胞中へのイオン 輸送系をめぐる競 合	Weiss, 1976
Na <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	<i>B. cereus, E. coli, Aspergillus niger</i>	Cd <sup>2+</sup> に対する 3 つ の陽イオンの防御 作用の増大。その強 さは次の順: Na <sup>+</sup> > Mg <sup>2+</sup> > Ca <sup>2+</sup>	Naidu, 1988
Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , CO <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup>	<i>S. cerevisiae</i>	互いに近いイオン 半径を持つイオン 間における輸送系 をめぐる最大の競 合	Naidu, 1988
Mg <sup>2+</sup>	CO <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup>	E. coli	細胞中への共通の イオン輸送系	Park, 1976
Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup> , Al <sup>3+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup>	E. coli	銅の吸収の金属イ オンと多量元素に よる抑制	Baldry, 1980
Mg <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	微量元素 [ママ]	細胞壁の共通中心 をめぐる競合	Babich, 1981
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CrO <sub>4</sub> <sup>2–</sup>	<i>Pseudomonas aeruginosa, P. fluorescens</i>	SO4 <sup>-</sup> が細胞中への CrO4 <sup>-</sup> 輸送を活性化	Ohtake, 1981
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	WO <sub>4</sub> <sup>2–</sup> , MoO <sub>4</sub> <sup>2–</sup>	Rhizobium sp.	WO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> が細胞中への MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 輸送を活性 化	Baxi, 1988
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	MoO <sub>4</sub> <sup>2–</sup> , CrO <sub>4</sub> <sup>2–</sup>	<i>S. cerevisiae</i>	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> とCrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> が細 胞中へのSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 輸送 を抑制	McCready, 1979
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$MoO_4^{2-}$	<i>Desulfovibrio desulfuricans, Desulfotomaculum orientis</i>	MoO4 <sup>-</sup> が細胞中へ のSO4 <sup>-</sup> 輸送を抑制	Fukui, 1989

SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$MoO_4^{2-}$ , $CrO_4^{2-}$ , $WO_4^{2-}$ , $SoO_4^{2-}$ ,	Desulfovibrio sp.	金属陰イオンが細 胞中へのSO <sup>2-</sup> 輸送 を抑制	Taylor, 1979
NO <sub>3</sub>	SeO <sub>4</sub> MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , WO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	E. coli	CrO <sub>4</sub> <sup></sup> , NO <sub>3</sub> , WO <sub>4</sub> <sup></sup> がMoO <sub>4</sub> <sup></sup> の還元を 抑制	Baldry, 1980

おそらく,立体化学的アナログ(特に,同一のイオン電荷を持つもの)は,微生物のタクソン上の位置とは無関係に,共通の輸送系を持っている。例えば,菌類

(*Blastocladiella emersonii*), 酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*), 細菌 (*Escherichia coli*) および藍色細菌 (*Anabaena variabilis*) はK<sup>+</sup>とRb<sup>+</sup>に関して共通の輸送系を持っている。 硫酸塩の立体化学的アナログであるモリブデン酸塩, クロム酸塩およびタングステン 酸塩は, 好気性 (*Pseudomonas aeruginosa, P. fluorescens*), 通性嫌気性 (*Escherichia coli, Saccharomyces cerevisiae*) および偏性嫌気性 (*Desulfovibrio desulfuricans, Desulfotomaculum orientis*) の微生物において共通の輸送系を持っている。

立体化学的アナログの存在は、細胞中への金属輸送の促進と抑制の両方をもたらす 可能性があると指摘することができる。

例えば, 硫酸塩は培養物 *P. aeruginosa* と *P. fluorescens* において細胞中へのクロム酸 塩輸送を活性化し, タングステン酸塩は培養物 *Rhizobium sp.*においてモリブデン酸塩 輸送を活性化する。

それに対応して、クロム酸塩とモリブデン酸塩は培養物 S. cerevisiae と硫酸塩還元 菌において細胞中への硫酸塩輸送系をめぐって競合する。

表 6.3 から分かるように、現在では、微生物と立体化学的類似性の第 1 グループに 属する金属(Fe<sup>3+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>)の間における相互作用は十分に解明されている。広い 範囲の pH の水中において陽イオンの形態で安定した状態を保つ金属(Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>その他)は第 1 グループに分類される。これらの金属は多量元素(と りわけMg<sup>2+</sup>)と共通の輸送系を持っており、したがって原則的にそれらの多量元素と 競合する。輸送系と受容系をめぐる競合は多量元素との関係においてだけでなく、そ れらの個別金属の間においても発現する。例えば、*Bacillus subtilis* と *Staphylococcus aureus*においてはMn<sup>2+</sup>とCd<sup>2+</sup>が競合し、*Klebsiella pneumoniae* と *Saccharomyces cerevisiae*においてはCo<sup>2+</sup>とNi<sup>2+</sup>が競合する。

媒質中に有機酸その他の外因性代謝物が存在するときには、金属がそれらの外因性 代謝物とともに金属イオンより著しく大きなサイズを持つ錯体化合物を形成するとい うことについては、さらに精緻な研究を行う必要がある。とは言え、それでもやはり、 陽イオンのサイズが立体化学的類似性の決定的な判断基準である公算がきわめて大き い。

例えば,陽イオンS<sup>6+</sup> (0.029~0.034 nm) とCr<sup>6+</sup> (0.035~0.053 nm) は互いに近いサ イズを持っているが,これらの元素は陰イオン形態においても立体化学的アナログと なっている。なぜなら,それらはいずれもより大きいイオン半径を持っているからで ある:SO<sup>2-</sup> (0.295 nm), CrO<sup>2-</sup> (0.300 nm)。おそらく,この効果は微生物の外因性代 謝物との間における錯体化合物の形成に際しても発現するものと思われる。

金属の立体化学的類似性,また立体化学的類似性による金属の非特異的蓄積は,微 生物界において広く見られる現象であると断言することができる。

さらにもう1つの事実が重要である。それは、同じ種類の立体化学的アナログ(例 えばMg<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>)は、相異なるタクソンに属する微生物(*Klebsiella, Escherichia*, *Bacillus, Alcaligenes, Aspergillus* 培養物) において共通の輸送系を持っている(表 6.3) という事実である。

以上に挙げた諸事実は,微生物による立体化学的アナログの非特異的輸送と生物蓄 積,またおそらく同位体変換は,生物全体に共通する法則性であるという結論を下す ことを可能にする。

微生物による能動輸送による金属蓄積は、金属濃度が多量元素の「生理的に必要と される濃度」と比肩しうる濃度である場合に特に効率的であることは明らかである。 多量元素(および微量元素)に対する微生物集団の需要は 10~20 mg/L であるという 事実を考慮すると、微生物による非特異的金属蓄積はまさにこの濃度範囲内で行われ ると推測することができる。金属濃度がそれより高い(20~100 mg/L)場合には、水 溶液からの金属の取り込みは、細胞壁(Beveridge, 1976; Beveridge, 1978; Brady, 1991; Marquis, 1976; Pooley, 1976)または莢膜多糖体(Ford, 1987; Gessey, 1988; Mittelman, 1985; Scott, 1987, 1987)による吸収時に行われることができる。

水溶液中の金属濃度が 100 mg/L を超えた場合には、細胞内における能動輸送も、 細胞構造体による吸収も必要とされる度合いの金属の取り込みを確保することができ なくなる。この場合には、金属の効率的な取り込みは、外因性代謝物(硫化物、リン 酸塩または炭酸塩)との間で不溶性金属化合物を形成する方法でのみ行うことができ る。

タシレフの論文(Tashirev, 1994, 1995)に示されている立体化学的類似性の違いに もとづくイオンの分類は、多数の金属のための現在はまだ知られていない共通の輸送 系が存在すると予想することを可能にする。例えば、イオン半径の大きさという点で、 Rb<sup>+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, Ra<sup>2+</sup>およびTl<sup>+</sup>はCs<sup>+</sup>の立体化学的アナログである。それだけでなく、Cs<sup>+</sup> はK<sup>+</sup>のアナログであるにもかかわらず、そのサイズという点ではK<sup>+</sup>よりNH<sup>4</sup>の方によ り近い。しかし、微生物の輸送系をめぐるCs<sup>+</sup>とNH<sup>4</sup>の間の競合はこれまで研究されて いない。理論的には、次の陽イオン対のための共通の輸送系が微生物において検出さ れることが十分にあり得る(表 6.1 参照)。

 $Hg^{2+} - Sr^{2+}$ ,  $Ca^{2+} - Sn^{2+}$ ,  $K^+ - Pb^{2+}$ ,  $Na^+ - Sn^{2+}$ ,

 $K^+ - Ag^+$ ,  $Ca^{2+} - Pb^{2+}$ ,  $Ca^{2+} - Hg^{2+}$ ,  $Na^+ - Cu^{2+}$ 

第6族金属の陰イオンと硫酸塩の間における輸送系をめぐる競合が一連の研究において示されている(表 6.3 参照)。しかし、硫酸塩と同じイオン半径を持つリン酸塩(PO₄<sup>3</sup>)が重金属陰イオンの輸送に及ぼす影響は研究されていない。

金属陽イオンの立体化学的類似性は微生物の酵素系にも発現している(表 6.4 参照)。 原則的に,多量元素とそれに近いイオン半径を持つ金属は酵素を活性化し,酵素の活 性中心において互いに置き換わることができる。

例えば、立体化学的類似性の第1ゾーンの多量元素(Mg<sup>2+</sup>とFe<sup>2+</sup>)は土壌微生物の ピロホスファターゼ活性を活性化する。それらの多量元素の構造的アナログであり、 それらに近いイオン半径を持つCo<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>およびMn<sup>2+</sup>(表 6.4 の例 9)はそれと同じ 作用を及ぼす。互いに近いイオン半径を持つ金属が持つ、酵素系中において酵素の機 能を損なうことなく互いに置き換わることができるという能力はおそらく広く見られ る現象である。

例えば、Co<sup>2+</sup>とZn<sup>2+</sup>は、様々な微生物において、L-ガラクチトール-1-リン酸デヒド ロゲナーゼ、アルコールデヒドロゲナーゼ、クレアチンイミノヒドロラーゼ、ヒポキ サンチン/グアニンホスホリボシルトランスフェラーゼ、ピロホスファターゼおよび 金属プロテアーゼ中で互いに置き換わることができる(図 6.4 の例 3, 5, 6, 7, 9 および 10)。Mn<sup>2+</sup>、Co<sup>2+</sup>およびZn<sup>2+</sup>(表 6.4 の例 3, 7, 9)等々は3種類の酵素にとって活性

	立体化学的アナログ		微生物の酵素系,	ЦШ	
	多量元素	アナログ金属	アナログの影響	山央	
1	Mg <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	<i>Escherichia coli</i> のアデニル酸シクラ ーゼ錯体の活性化	Liberman, 1985	
2	Ca <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup>	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> の活性グ ルコースデヒドロゲナーゼのアポ形 態からの再構築	Wilkens, 1989	
3	Ca <sup>2+</sup>	Cg <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup>	<i>Klebsiella pneumoniae</i> の L-ガラクチ トール-1-リン酸デヒドロゲナーゼ の活性化	Markwell, 1981	
4	Ca <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup>	<i>Bacillus staerothermophilus</i> の Cu/ Zn-スーパーオキシドジスムターゼ 中の銅のマンガンによる置換	Bannister, 1985	
5	Ca <sup>2+</sup>	Co <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup>	<i>Zymomonas mobilis</i> のアルコールデ ヒドロゲナーゼの活性のコバルトイ オンまたは亜鉛イオンによる回復	Kinoshita, 1985	
6	Fe <sup>2+</sup>	Co <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup>	<i>Flavobacterium filamentosum</i> のクレ アチンイミノヒドロラーゼの活性の 回復	Esders, 1985	
7	Mg <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup>	酵母のヒポキサンチン/グアニンホ スホリボシルトランスフェラーゼの 金属イオンによる活性化	Ali, 1986	
8	Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup>	<i>Pseudomonas</i> の8種類の菌株および <i>Xanthomonas sp.</i> の Cu/Zn-スーパー オキシドジスムターゼ中の銅のマン ガンおよび鉄による置換	Steinman, 1985	
9	Mg <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> Ca <sup>2+</sup>	Co <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup>	土壌微生物の 6 種類の菌株のピロホ スファターゼの活性化	Searle, 1977	
	Mg <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup> , Sr <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup>	<i>Pseudomonas fluorescens</i> のアポ形 態の金属プロテアーゼの活性化	Diermayr, 1987	
10	K+	Tl <sup>+</sup> , Rb <sup>+</sup>	酵母のアルデヒドデヒドロゲナーゼ とのTl <sup>+</sup> およびRb <sup>+</sup> の結合	Bostian, 1982	
11	Ca <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup>	グルコースデヒドロゲナーゼの活性 中心をめぐるイオンの競合	Wilkens, 1989	

表 6.4. 微生物の酵素系中における金属の立体化学的類似性

金属となっている。このように、第1ゾーンの立体化学的アナログは生理学的アナロ グでもある。

立体化学的類似性を考慮すると、酵素系にとって、イオンのサイズはおそらくイオンの電荷よりはるかに大きな意味を持っている。多くの場合、酵素系は相異なる電荷を持つ陽イオンに対して類似した性質を示している。例えば、 $\alpha$ -カルボキシラーゼは2価陽イオンのMg<sup>2+</sup>およびFe<sup>2+</sup>と3価陽イオンのAl<sup>3+</sup>およびFe<sup>3+</sup>の両方によって活性化される。ホスホグルコムターゼにとってのMg<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>とAl<sup>3+</sup>, Cr<sup>3+</sup>の関係においても、それと同じ法則性が発現している(Kalinin, 1971)。

それと同時に,いくつかの酵素はサイズの点で著しく相異なった陽イオンによって 活性化されることが可能であることに注目するべきである。

例えば, リンゴ酸デヒドロゲナーゼは互いに立体化学的アナログではないイオンで あるMg<sup>2+</sup>(第1ゾーン)とK<sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup>(第3ゾーン)によって活性化される(Kalinin, 1971)。ただし, これらの場合, 酵素の活性化は, おそらく金属陽イオンによって直接 的に決定されているのでなく, それ以外の要因――溶液のイオン力, S 電位, 等々― ―によって決定されている。

### 6.5.DNA 修復と同位体変換の問題

その中で同位体変換過程が行われる可能性のある,生物系のあり得る要素の1つは DNA 高分子である。この高分子は DNA 自体の自己複製過程を担当する遺伝子とタン パク質合成を制御する遺伝子を含んでいる。

周知のように、DNA 分子は、ヌクレオチド(アデニン、チミン、シトシン、グアニ ン)の対になった列を形成している 2 本の相補鎖からなっている。外部からの電離放 射線あるいはフリーラジカルが作用すると、DNA 鎖の切断が生じることがある。この ことはタンパク質から遊離した DNA 高分子に対して最も当てはまる。一本鎖切断は 特殊酵素リガーゼによって解消されるが、二本鎖切断は酵素によっては解消されない。 DNA の自己修復過程は、純粋に物理的な自己修復メカニズムのみに従って行われる。 そのメカニズムは次の研究において検討されている: Vysotskii, Kornilova, Samoylenko, 1996, 1997; Vysotskii, Pinchuk, 1999; Vysotskii, Kornilova, Samoylenko, Pinchuk, 1999, 2001; Pinchuk, Vysotskii, Zhmudskii, 1999; Vysotskii, Pinchuk, 1999; Pinchuk, 1999; Pinchuk, 1990, 2001。

これらの研究においては、二本鎖切断の両側に存在する末端ヌクレオチド対の間に おける相互作用は次のいくつかの要因に対して複雑な仕方で依存していることが示さ れている。

1) 切断幅L

2) ヌクレオチド*i*と*j*の表面に分布する電荷*q<sub>ni</sub>とq<sub>mj</sub>のクーロン相互作用。この作用* は電解質である細胞内水-塩媒質のイオンの遮蔽作用を考慮すると次のようになる。

$$V_C(L) = \sum_{ni,mj} V_C(r_{ni,mj})$$

3) 準静的周波数から X 線周波数までの周波数帯域内における誘電率 $\varepsilon(\omega)$ によって 特徴づけられる分散性,およびヌクレオチドの誘電率 $\varepsilon_i(\omega)$ と $\varepsilon_i(\omega)$ 

全相互作用には、表面に分布する相異なるヌクレオチド対の電荷(ワトソン・クリ ック型塩基対の具体的な幾何学的配置を考慮した、デル・レ [Eugenio Del Re]のσ電子 とヒュッケルのπ電子によって形成された電荷)のクーロン相互作用の総和、および 細胞内媒質中におけるそれらのヌクレオチド対の間の電気力学的なファン・デル・ワ ールス分散相互作用が含まれる。

行われた分析にもとづき、(二本鎖切断の向かい合う側における末端ヌクレオチド 対の潜在的に可能な6つの組み合わせAT-AT, AT-TA, AT-GC, AT-CG, GC-GC, GC-CG のうち の)末端ヌクレオチド対の4つの組み合わせAT-TA, AT-GC, AT-CG, GC-CG の場合には、 DNAの切断部位の間における相互作用の性格は、任意の切断幅Lのとき、それらの部 位が互いに引きつけ合っており、ポテンシャル障壁は存在していない状態と一致して いることが我々によって発見された。この結果は、末端ヌクレオチド対の切断後、そ の自己解消とDNAの健全性の自己修復が生じている可能性があるという結論に導く。 また、末端ヌクレオチド対の2つの特殊な組み合わせGC-GCとAT-ATの場合には、切 断幅が約 $L_0 \approx 7 \text{ Å}$ でpH  $\leq 7 \sim 9$ のとき(および水-塩細胞内液中における水和電子の相対 濃度が $\alpha \leq 10^{-7}$ のとき), DNA の切断された末端同士の間の空間中にはポテンシャル 障壁 $V(L,\eta,\alpha) > 0$  が存在し, このポテンシャル障壁が $L_0$ を超える幅を持つ切断部位の 自己修復過程を妨害する (図 6.3)。



図 6.3. 細胞内水-塩媒質中の相異なる pH と水和電子濃度における DNA 二本 鎖切断領域におけるポテンシャル障壁の空間的構造

この修復妨害障壁の存在およびその高さ $V_{max} \equiv V(L,\eta,\alpha)$ はクーロン力と分散力の 比に依存している。そのクーロン力と分散力は細胞内液の特性(粘性率 $\eta$ ,温度 T,イ オンと塩の組成および水和電子濃度その他)によって決定される。 $V_{max}$ の値は熱エネ ルギー $k_BT$ を著しく上回っている可能性がある(例えば、末端ヌクレオチド対 GC-GC の場合は $V_{max} \approx 3k_BT$ という値になる)。外的な放射線場が存在したり、また細胞内液 の特性の変化によってその他の作用が加わったりすると、末端対の間における相互作 用力の特性の変化、障壁 $V(L,\eta,\alpha)$ の変形およびその高さの減少が生じる。媒質のパラ メーターと外的作用の特性の組み合わせがある一定の組み合わせのとき、存在し得る あらゆるタイプの対切断に対する修復妨害障壁は消滅し、このことが任意のタイプの 切断の自己修復の確率の急激な増大および DNA 分解過程に対する著しい抑制をもた らす。このような過程は、事実上、DNA 生体分子の相互認識、そしてそれに続く生体 分子の個別フラグメントの自己修復という課題の解決に相当する。

切断の形成と解消の過程は拡散の性格を持ち,DNAの切断部位の表面に対する水分 子の揺動作用と関係していることが示された。直接的な計算が示すところによれば, この過程は細胞内媒質の温度に著しく依存しており,きわめて大きな緩和時間によっ て特徴づけられる(その時間は数時間に達する可能性がある)。二本鎖切断領域におけ るポテンシャル井戸の中央部分は放物型に近い形状を持っている。このことが,切断 領域中に存在している可能性のある原子の原子核のクーロン斥力の短時間抑制をもた らす諸過程の実現を促進している可能性がある。DNA ポリメラーゼの作用領域中にお いても,それと同様の触媒作用が生じている可能性がある。そのような諸過程の物理 学的側面に関するより詳細な分析は核変換理論をテーマとする章において既に行われ た。

## 6.6.生物学的対象物の適応,微量元素の類似性と同位体融合——生物進化の法 則性

このように、微生物による非特異的な金属蓄積という現象の根底には、培養物に適 合した金属と必須微量元素の立体化学的類似性の発現が横たわっている。

おそらく、この過程は、「元素組成の恒常性という遺伝的に予め決定づけられた要件 をそのそれぞれが持っている生物学的対象物の発展傾向と適応を、周囲世界における それらの元素の分布の偶然性と非一様性、また周囲環境のグローバルな絶え間ない変 化といかにして両立させるか?」というグローバルなジレンマに対する、進化からの 一種独特な応答なのであろう。

必須微量元素またはそれらのアナログの形成を伴う増殖中の生物系における変換過 程それ自体もまた,そのジレンマに対する進化からのそれと同じ程必然的な応答なの かもしれない。

我々の意見によれば、その変換過程は、立体化学的類似性にもとづいた競合が生じ ている所において(少なくとも輸送系と酵素系において)生じる。その競合が発現す る空間的領域が、変換それ自体がその範囲内において行われる領域を決定する。

この一種の原子炉が稼働している具体的な場所を示すことは可能であろうか? そ のような場所はきわめて多数存在しなければならないことは明らかである(もしそう でない場合には、その反応はきわめて稀な事象となり、それを検出することは不可能 となるはずである)。変換が大きな確率で生じるのは、生物学的対象物の中の、ダイナ ミックな作用を受けるような構造的部分(成長ゾーン、過渡的な輸送系、あらゆる種 類の擾乱に対する動的応答系等)であることも指摘することができる。

その変換効率は、核相互作用に対するクーロン障壁の短時間除去過程の出発点とな る前提条件が満たされるかどうかに対してきわめて著しく依存していることも明らか である。変換過程に関与する元素(同位体)は可溶形態で存在している必要がある(金 属の場合,それは動員過程に相当する)。そのような過程の進行の確率が大きくなるた めには、可溶形態の初期同位体成分が随伴化学元素から分離されている必要があるこ とは明白である(例えば、陽子あるいは重陽子が関与する核相互作用は、可変的なク ーロン障壁の存在により、それらの原子核が水分子の組成に含まれているか、それと も独立したイオンの形で存在しているかに対して相異なる仕方で依存しながら進行す る)。この要件は、上記において検討したスキームに類するスキームに従って酸化還元 過程の総体を詳細に検討し、当該酸化還元電位を考慮する必要があるという結論に直 ちに導く。

そして最後に、変換産物の最終的局在化は、その産物が当該培養物に適合している かどうかに依存している。適合した元素(例えば、同位体組成を除けば天然鉄とまっ たく異ならない、融合された鉄)の場合には、その局在化は、当該微量元素にとって 自然な特性的分布と一致する。それに対して、異種の非適合的元素の場合には、変換 産物の最終的局在化は、上記において検討された不純物の非適合的元素の分布と一致 する(細胞表面上への体積、莢膜多糖体による結合、金属と細胞膜タンパク質の錯体 の形成、細胞壁構造体による結合、細胞質タンパク質および細胞内膜構造体との結合、 あるいは細胞内における非可溶性産物の形成、等々)。

「生体原子炉」の場所の具体的な探求は位置敏感検出器による精密分析法(例えば, トンネル顕微鏡法あるいは高解像度質量分光法)を用いて行うことができる。

# 第7章 生物系における同位体変換現象の利用の見通しとあり得る 方法

## 7.1. 病因学的に微量元素欠乏に起因する疾患の予防と治療を目的とする同位 体変換現象の利用

19世紀初頭まで、あらゆる生物体は限られた数(約12~15種類)の化学元素(いわゆる多量元素)から構成されているという見方が一般に認められていた。普通、それらの多量元素に分類されていたのは、H,C,N,O,P,S,K,Na,Ca,Feとさらに約10種類の「生物起源元素」であった。当初、多量元素となっているのは最も軽い元素であるとみなされていた。その後、その見方は放棄され、多量元素は、それらが持つ炭素と化合物を形成する能力によってそれ以外の元素と区別されるようになった。

この問題に対する原理的に新たな見方は、生体物質の地球化学的解明に関するヴェ ルナツキーの画期的研究の後に生まれた。それらの研究の基礎には、彼によって初め て行われた、地球の生物圏の作用がもたらす壮大な規模の地球化学的結果に関する詳 細な分析が置かれていた。生物圏は十億年の間に地球の陸面と水面の生物起源の構造 全体を根本的に変化させた。生物圏は自然形成と自然制御の真の進化要因となった。 進化の過程において、生物界はそれらの過程と互いに極限まで結びつき、それらに適 応したものとなった。その結果、それらの変化は遺伝コードの中に記録された。各種 の生物体中における多量元素の比がほぼ同一であり、その著しい違いは生物体の構造 と関係した違いのみであるのに対し、微量元素の含有率は(これといった理由もなし に、生物体の種類によって)きわめて大きく変化しており、それらの種類ごとに厳密 に固定されている。それらの違いはきわめて大きい場合がある。普通、微量元素の含 有率は 0.01%ないし 0.001%を上回らないのに対し、Si, Fe, Mn, Al, Sr, Ba といった各種 化学元素を集積し、数%も含有している生物体が存在しているのだ! それは、きわめ て高い効率を持った正真正銘の濃縮工場なのである。実際、個別の化学組成が、当該 のタイプの生物体の種の特徴とみなされている場合がある(第一要素量子化)。

各種化学元素の(陸上生物界全体の)平均濃度分布を図7.1に示す(Vinogradov,1935)。 生物学的対象物中におけるより重い元素の濃度は(平均的には)減少しているものの, 原子番号の増大に伴う元素濃度の低下はけっして単調ではない。このことは,進化の 法則性と個別微量元素の機能性を反映している。それだけでなく,偶数番号と奇数番 号の(原子核中の陽子の数が偶数と奇数の)元素の分布は特異な周期性を示している。 その周期性は結局のところ核種の核電荷の性質と関係している。

この見方は、多数の風土病の原因は、周囲環境(土壌、水、植生)中における特定 の元素(微量元素)の欠乏または過剰であることが経験的に突きとめられたことによ って完全な裏付けを見出した。正常に機能している生きた生体中においては、事実上 すべての化学元素が存在していなければならないことが判明した。正常な条件下では、 多量元素と微量元素の両方が厳密に一定の比率で(一定の濃度で)存在し、生体の正 常な生命活動を保障しなければならない。微量元素の量の(当該種類の生物体にとっ ての最適濃度との関係において)増大または減少の方向へのあらゆる逸脱は病理を引 き起こし、著しい逸脱は疾患をもたらす。

微量元素の欠乏または過剰は、ビタミンの場合と同様に否定的な結果をもたらす。 これはおそらく偶然ではない。なぜなら、微量元素はビタミン、酵素およびホルモン の組成に含まれており、それらの作用を著しく強く調節しているからである。例えば、



図7.1.各種化学元素の(陸上生物界全体の)平均濃度分布

チロキシンはヨウ素を 65%, ビタミンB<sub>12</sub>はコバルトを 4%含有している。酵素の炭酸 デヒドラターゼの組成には亜鉛が含まれており, ヘモグロビンの合成は銅なしでは不 可能である。

それぞれの微量元素にはその病理がある。例えばヨウ素欠乏は甲状腺機能の低下と それに対応する諸症状をもたらすのに対し、その過剰は中毒性甲状腺腫をもたらす。 マグネシウム欠乏は一般的な興奮(けいれん、くる病の発症)として発現し、その過 剰は生体の一般的な抑制(だるさ、眠気)をもたらす。病理と最適微量元素組成の撹 乱との間の直接的な関係を示すそのような例はきわめて多数存在する。既に解明され ている関係は、大量に存在する微量元素の場合において、その最適組成の撹乱と相関 している関係のみにすぎない。微量元素の正常濃度がきわめて小さい場合には、その ような相関を検出することは事実上不可能である。記録するのが難しいそのような撹 乱と今は関係づけられていない多数の病理は、実は他ならぬそれらの撹乱によって引 き起こされているとみなすことには十分な根拠が存在する。

遺伝コードが発見されたことによって初めて明らかになったさらにもう1つの事情 がある。(平均的に)バランスの取れた個別的化学組成が当該タイプの生物体の種の特 徴に分類される(第一要素量子化)のに対し,DNAに書き込まれている当該タイプの 内部の各個体の個別的差異は第二要素量子化に分類することができる。そしてこのこ とは,各個体 [individual] は微量元素の個体別分布 [personal distribution] を必要としてい るという結論に導くことができる。生物界は個体別化 [personalize] されたものになる!

生物学的に必須な微量元素は生物体のあらゆる器官の組成に含まれているが、その際、一連の場合においては、それらの元素は特定の器官に自然な形で大量に集中している。バリウムは眼の色素上皮と虹彩に、フッ素は歯と骨に、ヒ素は実質性器官に、放射性銅は骨髄中に蓄積される性質を持っている(Vavilova, 1992)。

臨床医たちは古くから一連の法則性に気づいていた。その一部分は理論的分析によって既に裏づけられているが、その根拠づけを待っている部分もある。特に、ナトリウムイオンとカリウムイオンが膜上における諸過程において重要な役割を果たしていることは良く知られている。銅は造血および生体の一般的な成長・発達過程に関与し、脳下垂体前葉のホルモン活性を促進する。カルシウム、マグネシウム、ストロンチウ

ム、バリウムおよびラジウムは骨組織の形成に関与している。ホウ素は人間の生殖機 能において重要な役割を果たしている。それと同時に、ホウ素は炭化水素代謝過程に 能動的に関与している。アルミニウムは結合組織に能動的作用を及ぼしている。タリ ムとホウ素は神経系に能動的に作用している。ケイ素は結合組織の支持機能と防御機 能に、また鉛とスズは中枢神経系の機能に能動的に関与している。硫黄は一連のアミ ノ酸(シスチン、システイン、メチオニン)および酵素とホルモンの組成に含まれ、 それらにおける死活的に重要な酸化還元過程に関与しているため、生命活動過程の確 保においてきわめて大きな役割を果たしている。

医療の現場においては、内因性(すなわち、生体自体によって分泌される)微量元素の不足量は、通常、生体外の供給源から得られたその元素(外因性微量元素)を外部から人為的に投与する方法で補充されている。その際、その投与は次の経験則にもとづいて行なわれている。「推定によれば、生体の元素Xの毎日の必要量は100 µgである。しかし、元素Xのバイオアベイラビリティは大きくないので、1日に200 µg投与する必要がある」。こうして、あれこれの微量元素の欠乏が生じたときは、明らかに過剰な量の当該微量元素が投与される。そのような「治療」がもたらす結果を事前に予想することはかなり難しい。ビタミン過剰症はかなり詳しく記述されているのに対し、微量元素の過剰含有率に起因する病理(障害)に関するデータは乏しく、しかも相矛盾している。しかし、進化の過程は任意の系の最適化を必然的にもたらす。微量元素の組成もその例外ではないのだから、生物体中における各種微量元素の含有率は正確にバランスが取れていなければならない。

同位体変換効果を利用すれば、微量元素欠乏に起因する疾患の予防と治療の問題を 解決することができる。このことが、生体の内部資源を動員することによって治療効 果を維持しつつ、外因性微量元素による生体への過負荷を解消することを可能とする はずである。個体別化された微量元素分布の必要性を考慮した場合、そのようなアプ ローチが持つ特別な重要性が明らかとなる。微量元素分布の(当該生物種全体につい ての)いかなる平均的パラメーターも、ここでは何の役にも立たない。

最適な解決法は、微量元素の上記の不足量を内因的方法によって補充することであ る。この方法においては、必要とされる微量元素の前駆体(変換のための出発成分) が外部から生体に投与される。次に、生体自体の内部において必要とされる微量元素 への変換反応が生じる。病因学的に微量元素欠乏に起因する疾患のこのような予防・ 治療方法に従った場合には、融合される微量元素の個別的生体にとっての必要量のみ が、それらが必要とされる器官においてのみ吸収され、固定されることになる。この ような自己調節は、第5章で検討した、最適量子化系中における核相互作用の過程で ゆらぎ的に形成され、生物学的対象物の構造中への適応的組み込みの過程で固定され る同位体の融合過程からの直接的結果である。

## 7.2. 同位体変換現象にもとづくバイオテクノロジーの方法による希少軽・重安 定同位体の製造

安定同位体の製造は技術における有望分野の1つとなっている。同位体はマイクロ エレクトロニクス,医療,製薬,材料工学その他の科学技術領域において利用されて いる。しかし,当該化学元素の組成に含まれる所要の同位体の天然混合物からの分離・ 濃縮プロセスにかかる費用がきわめて高いため,同位体の利用は現在はまだ制約され ている(特に希少同位体と超希少同位体の場合)。上記において検討した生物系におけ る同位体変換方法は,希少同位体の製造とその最適利用を目的とした増殖中の微生物 培養物中における常温核融合過程の利用の可能性を予測をすることを可能にしている。

増殖中の微生物培養物中における同位体変換を用いて製造することが可能ないくつ かの希少同位体に関するデータを下記に示す。同位体名の後の括弧内の数字は,自然 状態における当該化学元素中におけるその同位体の含有率(パーセント)である。

$$\begin{split} B^{11} + d^2 &= C^{13} (1.0\%) \\ Be^9 + Be^9 &= 0^{18} (0.2\%) \\ B^{11} + He^4 &= N^{15} (0.4\%) \\ F^{19} + N^{14} &= S^{33} (0.7\%) \\ Al^{27} (100\%) + d^2 &= Si^{29} (4.0\%) \\ P^{31} + Be^9 &= K^{40} (0.001\%) \\ P^{31} + Be^{11} &= Ca^{42} (0.6\%) \\ Cl^{35} (75\%) + Li^7 &= Ca^{44} (0.6\%) \\ Cl^{37} (25\%) + Li^7 &= Ca^{44} (2\%) \\ Ti^{48} (74\%) + Be^9 &= Fe^{57} (0.6\%) \\ Co^{59} (100\%) + d^2 &= Ni^{61} (0.6\%) \end{split}$$

 $Cu^{65}(31\%) + d^2 = Zn^{67}(0.6\%)$ 

これらすべての反応は無閾値の発熱反応であり、したがって生物系(例えば微生物 培養物)の増殖過程においてエネルギー消費なしで進行することができる。これらの 反応の最終産物は、培養物の増殖にとって必要とされる化学元素の同位体である。こ のことから、これらの反応を最大限最適化するためには、形成される同位体のアナロ グである化学元素が培地の組成中に存在してはならない(あるいは可能な限り最小限 の量しか存在してはならない)という結論が直ちに導き出される。そのような最適な 場合には、融合される同位体は増殖中の培養物の生命活動過程に直ちに引き入れられ、 このことが、それらの同位体が崩壊して出発同位体成分に逆戻りする過程を予防する。

同位体変換効果は、これらの反応にもとづいて鉄族原子核までの化学元素の軽い原 子核を形成するだけでなく、超ウラン元素までのより重い原子核X2の融合の実現をも 可能にする。重い原子核のエネルギー的に有利な反応の進行が可能か否かは、相互作 用する原子核の系の最小エネルギーに関する要件によって決定される。

ベーテ-ヴァイツゼッカーの公式から導き出されるように,原子核の全エネルギー は次の形を持っている。

$$\begin{split} E(Z,A) &= (A-Z)M_nc^2 + ZM_pc^2 - \varepsilon_1A + \varepsilon_2A^{2/3} + \varepsilon_3Z^2/A^{1/3} + \varepsilon_4(2A-Z)^2/A - \\ &-\delta\varepsilon_5/A^{1/2} \end{split}$$

ここで(A - Z) $M_n c^2 \geq Z M_p c^2$ は原子核のすべての(A - Z)個の中性子とZ個の陽子の静止エネルギーの総和;  $\epsilon_1 A$ は原子核中のすべての核子の結合エネルギー(他の被加数によって決定される,核子のクーロン相互作用,核子の表面効果および対生成効果の特性は考慮しない);  $\epsilon_2 A^{2/3}$ は原子核の表面エネルギー( $\epsilon_2 \approx 17.23 \text{ MeV}$ );  $\epsilon_3 Z^2 / A^{1/3}$ は原子核中の陽子の相互斥力のクーロンエネルギー( $\epsilon_3 \approx 0.69 \text{ MeV}$ );  $\epsilon_4 (2A - Z)^2 / A$ は核子系の「対称」エネルギーであり,陽子数と中性子数の同等性が損なわれたときは、それらのフェルミ粒子に対するパウリの原理が存在する結果、より高いエネルギー準位を占有する必要があるため、増大する;  $\delta(A, Z)\epsilon_5 / A^{1/2}$ は同種類の核子間における対相関エネルギーであり、このとき、Aが奇数の原子核の場合は $\delta(A, Z) = 0, A \geq Z$ がともに偶数の原子核の場合は $\delta(A, Z) = -1, A$ が偶数で Z が奇数の原子核の場合は $\delta(A, Z) = 1$ であり、 $\epsilon_5 = 12 \text{ MeV}$ である。

出発同位体成分の電荷 $Z_3 = Z_1 + Z_2$ と質量 $A_3 = A_1 + A_2$ を変化させながら進行する

重原子核の融合反応

 $X_{Z_1}^{A_1} + X_{Z_2}^{A_2} = X_{Z_3}^{A_3}$ 

のエネルギー的有利性の条件は、その融合反応に関与する原子核の結合エネルギーの プラスの変化という条件、すなわち

$$\Delta E = E(A_1, Z_1) + E(A_2, Z_2) - E(A_3, Z_3) \ge 0$$

によって決定される。

重原子核と超重原子核が関与するそのような融合反応のエネルギー的有利性の物理 学的根拠は,重原子核または超重原子核がきわめて軽い(水素から炭素までの)同位 体と相互作用するとき,軽い同位体の吸収に起因する結合エネルギーの増大は,重原 子核または超重原子核の質量の増大に起因する結合エネルギーの減少より著しいとい う事実である。

例えば、プラスのエネルギー収率は、トリウムが関与する融合反応

 $Th^{232} + He^3 = U^{235}$   $\Delta E = 9.6 \text{ MeV}$ 

およびレニウム同位体が関与する融合反応

$Re^{185} + p^1 = 0s^{186}$	$\Delta E = 6.5 \text{ MeV}$
$\operatorname{Re}^{185} + \mathrm{d}^2 = \mathrm{Os}^{187} \ (1.6\%)$	$\Delta E = 6.8 \text{ MeV}$
$\operatorname{Re}^{187} + p^1 = \operatorname{Os}^{188}$	$\Delta E = 7.3 \text{ MeV}$

において生じる。

後者の融合反応のエネルギー的有利性は,特に,レニウムのすべての同位体は,自 然条件下では生物系における変換過程において徐々にオスミウムの同位体に変換して いくことを物語っている。

プラスのエネルギー収率を特徴とする鉄より重い原子核のさらにいくつかの融合反応のリスト(これには、その原子核が当該化学元素中にきわめて少量しか存在しないために希少なものとなっている融合反応も含まれている)を例として挙げよう。

 $I^{127} + Li^7 = Ba^{134}$  (2.4%)

 $Ta^{181} + Li^6 = Os^{187}$  (1.6%)

 $Ta^{181} + Li^7 = Os^{188}$ 

 $W^{183} + D^2 = Re^{185}$ 

レニウムは生化学反応においてマンガンの代替物となる元素である。 次の変換反応を提案することも難しくない。

 $Os^{190} + Li^7 = Au^{197}$ 

この反応は幾世紀もの間,あらゆる世代の錬金術師たちの「黄金の夢」であった。そして今,この反応が増殖中の微生物培養物のバルク中における金の融合を自然な形でもたらそうとしている。第6章に挙げたデータから,カリウム(K<sup>+</sup>のイオン半径は1.33Åである)は金(Au<sup>+</sup>のイオン半径は1.37Åである)の立体化学的アナログであるという結論が導き出される。培養物の増殖の過程で,カリウムは金によって代替されなければならなくなる。この反応が首尾よく進行するのは,微生物培養物がその中で増殖している培地がカリウム欠乏状態にあり,かつオスミウムとリチウムを追加的に含有している場合に限られる。質量欠損の計算から,この反応は無閾値の発熱反応で

あり, エネルギーの消費を必要とせず, この反応の進行に伴ってΔE = 7.37 MeVのエネ ルギーが放出されるという結論が導き出される。言うまでもなく, このような反応を 実現するためには, 一定の努力と知識が必要とされる。なぜなら, それ自体は培養物 の増殖を抑制しないような可溶性のオスミウム塩とリチウム塩の組み合わせを選び出 す必要があるからである。それだけでなく, 培養物自体が融合される金に適応してい なければならない(金も培養物の増殖を抑制してはならない)。そしてこれはもはや, 微生物学の専門的問題である。

金に劣らず価値ある金属はプラチナである。その結果2種類のプラチナ同位体が融合される無閾値の発熱反応の若干の例を挙げることができる。

$$Re^{187} + Li^7 = Pt^{194}$$
  $\Delta E = 8.47 MeV$ 

$$W^{186} + Be^9 = Pt^{195}$$
  $\Delta E = 1.65 \text{ MeV}$ 

これらの反応は、微生物培養物がその中で増殖している培地が鉄欠乏状態にあり、 かつレニウムとリチウム(第1の場合)またはタングステンとベリリウム(第2の場 合)を追加的に含有している場合に進行することになる。二価鉄のイオン半径 (0.75~0.83 Å)と二価プラチナのイオン半径0.8~0.85 Åは事実上同じであるから、鉄 が存在しないときには、融合されるプラチナ原子は増殖中の微生物培養物によって吸 収されることになる。

## 7.3. 生物系における同位体変換現象を利用した放射性廃棄物のリサイクルの 可能性について

融合反応にもとづいて安定的な軽同位体,中間質量同位体および重同位体からより 重い同位体を形成するだけでなく,放射性の軽同位体,中間質量同位体および重同位 体(例えば使用済核燃料や計量技術で利用される同位体の成分)を微生物培養物の生 命活動過程に必要とされる化学元素の安定同位体に変換する方法により,それらをリ サイクルすることも可能である。

そのような廃棄物のリサイクルの問題はきわめて重要である。それは一連の事情と 関係している。各種の評価によれば、世界全体のエネルギーバランスに占める原子力 エネルギーの割合は、現在、10~20%である。一連の工業先進国においては原子力エ ネルギーが圧倒的な割合を占め、生産・消費されるエネルギー資源全体の70%に達し ている。しかし、現在、原子力エネルギーの発展過程は事実上停止している。その主 な原因は、チェルノブイリ原発事故のショックにではなく、使用済核燃料の再処理、 放射性廃棄物の保管とリサイクルの問題の満足すべき解決方法を見出すことができて いないことにある。この問題をより詳しく検討しよう。

周知のように,発電用原子炉は2つの主要タイプに分けられる。1つは高濃縮ウランで稼働する高速中性子炉,もう1つはU<sup>235</sup>の濃縮度が3~15%のウランで稼働する 熱中性子炉(炉のタイプ別に軽水炉,重水炉,チャンネル型ウラン黒鉛炉,ガス炉, 等々がある)である。

原子炉の稼働過程において、U<sup>235</sup>の分裂に伴ってきわめて大きな熱中性子捕獲断面 積を持つ一連の同位体(特にキセノン同位体)が形成され、その結果、燃焼度が増大 するにつれて原子炉の反応度は徐々に低下する(「キセノン中毒」が発生する)。一定 のレベルまでの間においては、それは炉制御系の制御棒によって相殺することができ る。燃料がある燃焼度に達した後は、原子炉は事実上制御不能となる。許容燃焼度は 熱中性子炉のタイプの違いに応じて 5%ないし 20%であるが、それを超えた後は、燃 料集合体は取り出され、新しいものに交換されなければならない。このように、熱中 性子炉で使われる高価な濃縮ウランU<sup>235</sup>の少なくとも80%は未利用のまま残る。

高速中性子炉の場合には、状況はそれより幾分単純となる。相異なる同位体の高速 中性子捕獲断面積の違いが、熱中性子の場合より著しく小さいからである。その結果、 原子炉のキセノン(あるいはそれ以外の)中毒の危険性は著しく低下する。ところが、 ウラン原子核1個の分裂時に別の元素の2~3個の原子核が形成されることにより、核 燃料の密度は燃料が中性子照射を受けるにつれて低下し続け、その体積は増大する。 燃料棒の「照射誘起体積膨張」が起こり、燃料交換時に原子炉からの燃料棒の引き抜 きができなくなる恐れが生じる。その結果、高速中性子炉の場合にも許容燃焼度は制 限され、通常、40%を超えない。高速中性子炉の場合にも核燃料の半分以下しか利用 されないことが分かる。それは同位体U<sup>235</sup>の濃縮度がより高い燃料であり、したがっ てより高価であることに注目する必要がある。

数十年間にわたって原子力エネルギーの発展に取り組んでいたすべての国において, 未燃焼の濃縮ウランU<sup>235</sup>の再生を目的として照射済燃料の再処理の試みが行われてい た。天然ウランの一次製錬と精製錬の際にその優れた性能を示してきた吸着法と抽出 法を用いた古典的な湿式冶金法と並んで,かなりエキゾチックな高温冶金技術(例え ば,溶融塩を用いた方法)およびフッ化技術が利用され,これらの技術に大きな期待 がかけられていた。

当初は前途有望と思われていたこれらすべての研究開発は予期した成果を生まない ことが判明し、すべての国で打ち切られた。低濃縮ウランをベースとする照射済燃料 (熱中性子炉の燃料棒)の再処理に関する現在世界に存在する少数の技術的系譜は、 天然ウランの精製錬に用いられているのに類似した古典的な吸着法と抽出法に基礎を 置いている。

高速中性子炉の運命はそれよりさらに未確定である。高速中性子炉の照射済燃料の 満足すべき再処理技術を開発することはできず、現在、そもそも照射済燃料の再処理 は行われていない。おそらく、現在最も広く普及している既存のロシア型加圧水型原 子炉とウラン黒鉛炉が、近い将来においても発電用原子炉の主要タイプであり続ける ものと思われる。

毎年,世界では各種のタイプの原子炉から約1万tの使用済核燃料が取り出されて いる。原子力エネルギーの発展に取り組んでいたほとんどすべての国は,当初,照射 済燃料の再処理の試みを行っていたが,経済的にも環境的にも受け入れ可能な技術の 開発の試みが成功しないまま長い年月が過ぎた後,再処理を断念してしまった。現在, フランス,イギリスおよびロシアでは再処理工場がまだ活動しているが,フランスで もイギリスでも再処理工場の活動停止問題が既に議論されている。3か国における再 処理工場の処理能力は,それらの国の原子力発電所の原子炉から毎年取り出される照 射済燃料の約10%の再処理しか保障することができない。アメリカは照射済燃料の再 処理のあらゆる試みを既に1970年代に断念し,再処理されていない使用済燃料集合 体を専用貯蔵施設に保管する道を選んだ。

現在,世界には未再処理の照射済核燃料が10万t以上蓄積されている。既存の貯蔵施設は満杯に近い。このように,照射済燃料の再処理と蓄積をめぐる現状の継続は, 原子力エネルギーの利用の断念,あるいは少なくとも世界の最も人口密度の高い(すなわち,経済的に最も発展した)諸国における原子力発電所建設に対する著しい制限 を遅かれ早かれもたらすことになる。パラドックス全体は,他のエネルギー生産施設 と比べた原子力発電所の主要な長所は,電気・熱エネルギーの大消費地のすぐ近く, すなわち,まさに人口密度の高い地域に建設することが可能であるということにある。 原子力発電所と照射済燃料再処理・保管施設を大消費地から遠く離れた地域に余儀な く移転させることによって原子力エネルギーがその長所を失うことは,そもそも原子 力エネルギーを利用することの合目的性に疑問を生じさせることになる。

ほとんどすべての国が照射済燃料の再処理を断念したことには2つの原因がある。

第1の原因は純粋に経済的な問題と関係している。当初,照射済燃料の再処理は, 未燃焼の分裂性物質(濃縮ウラン)を抽出し,次に再生ウランから燃料棒を再製造す る目的で取り組まれていた。化学的再処理にかかる費用は,ウラン同位体の分離,す なわちその濃縮プロセスにかかる費用よりはるかに低いと考えられていた。ところが 同位体分離技術が発展するにつれて,とりわけガス分散法から遠心分離法への移行が 至る所で行われるようになるにつれて,ウラン濃縮プロセスの原価は急激に低下して いった。それと同時に,再生ウランの高いバックグラウンド放射能を創出している核 分裂片を二次ウランから除去する技術の開発は,長い年月をかけてもどうしても成功 しなかった。

これらすべての事情が重なったことにより,未燃焼の分裂性物質の抽出を目的とし た照射済燃料再処理の経済的合目的性は失われた。照射済燃料再処理の必要性の唯一 の根拠として残ったのは,天然ウランの確認埋蔵量に限りがあり,間もなくそれが枯 渇する可能性があるという事情のみであった。

第2の原因は第1の原因ほど自明ではないが、より深刻である。既存の照射済燃料 再処理技術は廃棄物ゼロ技術ではなく、活動している生産施設は閉じたサイクルに従 って稼働していない。それだけでなく、照射済燃料の再処理の結果、既存の技術では それ以上の再処理の対象とならず、処分場での埋設処分の対象とされる放射性廃棄物 の量(重量で計算した量)は、最初の量と比べて何百倍、何千倍も増大する(当然、 その放射性廃棄物の比放射能は相応分だけ低下している)。

例として挙げると、1tの照射済燃料から、それとほぼ同量またはそれよりやや多い 量の固体廃棄物と許容限度まで高い放射性廃棄物(核分裂片の各種元素の濃縮された 放射性同位体,ガラス固化またはセメント固化された放射性同位体)が得られ、それ らを高レベル放射性廃棄物用の専用処分場に数千年以上保管する必要がある。それだ けでなく、10~20tの中レベル放射性固体・液体廃棄物(核分裂片の残りと燃料棒の 切断・再処理プロセスで利用された各種の非放射性物質・材料との混合物)が形成さ れ、これらも埋設処分の対象となる。最後に、数百tの低レベル放射性気体・液体・ 固体廃棄物が形成される(各種の気体排出物,洗浄水,排水,解体された設備,使用 済みの抽出剤と吸着剤,使用済の保護具,放射性物質によって汚染されたその他のあ らゆる化学製品廃棄物)。これらの廃棄物は高価な専用設備を必要としない普通の処 分場で埋設処分される。しかし、高レベル放射性廃棄物とは異なり、これらの廃棄物 の体積は膨大である。

こうして,取り出された照射済燃料を既存技術に従って再処理すると,その結果, 1000万t以上の低レベル放射性廃棄物が形成される可能性がある。しかも,気体廃棄 物の問題は未解決のまま残されている。今のところ,気体廃棄物は大気空気で相対的 に安全な放射性汚染物濃度まで希釈した後,単に大気中に放出されている。そのとき, 集団線量は変化しないことに注目しよう。

これらの要因を考慮すると、照射済燃料を保管する方が、それを既存技術に従って 再処理するより低費用でより安全であるという結論は完全に容認可能であり、根拠が ある。未再処理の照射済核燃料の保管にかかるきわめて高い単位当たり費用、原子力 災害のおそれのある高レベル放射性廃棄物のための専用保管施設の建設と保守にかか る膨大な費用にもかかわらず、多くの専門家の意見によれば、これは既存技術による 再処理よりもはるかに低費用でより安全である。しかし上記において既に指摘したよ うに、全世界における既存の照射済燃料保管施設は満杯状態にあり、世界の人口密度 の高い地域や国(すなわち、保管施設に対するニーズが最も高い場所)に新たな保管 施設を建設することは事実上不可能である。

既存化学技術の限られた可能性は、古典的な化学的アプローチに従った場合には、 再生ウランおよび各種の低レベル放射性廃棄物(固体,液体および気体廃棄物)は化 学的には純粋であるということと関係している。すなわち,化学的不純物としての放 射性同位体の含有率は無視し得るほど小さい値を持っている。それらの廃棄物は放射 線化学的にのみ「汚い」のである。現在のところ、合理的な経済的費用という条件を 満たしつつ、それほどまでに微々たる量の放射能汚染を除去する能力を持つ、効率的 な化学的、物理化学的あるいは物理学的なプロセスと技術は存在しない。

燃料棒の全放射能は、原子力発電所に設置されている冷却プール内で3年間保管されている間に、最も寿命の短い同位体の崩壊によってほぼ1桁低下する。残存放射能のうち99%以上は、相対的に寿命の長いストロンチウム、ジルコニウム、ルテニウム、 セシウム、ヨウ素および希土類元素の同位体が創出している。不活性ガスの同位体も 一定程度の放射能を創出している。

希土類元素,ヨウ素,不活性ガスの同位体,またストロンチウムとセシウムの著し い部分は,化学的再処理プロセスにおいて再生ウランからかなり容易に除去すること ができる。重大な問題となっているのはルテニウム同位体の除去である。ルテニウム はその化学的性質(多数の原子価状態およびそれらの間における遷移の容易性)によ り,技術的連鎖の全体にわたって分布し,その連鎖を汚染している。

低レベル放射性廃棄物は、キセノン、クリプトンおよびヨウ素を除く、それと事実 上同じ元素の放射性同位体によって汚染されている。

気体廃棄物の放射能は、(エアロゾルを除けば)主に、その大部分がキセノン同位体 の崩壊の結果形成される不活性ガス(クリプトンとキセノン)およびヨウ素の同位体 によって決定される。

きわめて高レベルの高線量の電離放射線に対する耐性を持つ細菌培養物中におけ る同位体変換効果は、これらの問題を生物系の利用によって解決する可能性に期待す ることを可能にしている。

古典的な化学的プロセスとは異なり,増殖中の微生物系は,各種培地中からの各種 化学元素(放射性同位体を含む)の抽出のきわめて高い選択性と完全性を確保するこ とを可能にする。また,常温変換現象は,細菌培養物が吸収した放射性同位体を別の 種類の化学元素の安定同位体に転換することを可能にする。当然のことながら,ここ で語っているのは,照射済燃料と高レベル放射性廃棄物の再処理の最初の段階におい て微生物系を全面的に適用することが可能であるということではない(まったく自明 な理由により,そのようなことは語ることができない)。

細菌培養物利用の有望な方向性と思われるのは、何よりもまず、次のいくつかの方 向性である。

1) 再生ウランからの核分裂片除去の最終段階において, 燃料棒の再製造時に重厚な 製造チャンバーや遠隔制御を用いずに再生ウランを取り扱うことを可能にするレベル まで, 核分裂片を精密に除去する。

2) 原子力発電所および照射済燃料再処理工場の気体排出物から不活性ガス同位体 とその崩壊生成物(主としてヨウ素)を除去する。

3)低レベル放射性廃棄物を非放射性廃棄物として埋設することを可能にするレベル, すなわち自然放射線バックグラウンドのレベル(8~40 µR/h)まで, 低レベル放射性廃棄物から放射性物質を除去する。

4) 自然放射線バックグラウンドのレベルまで, 原子力発電所および照射済燃料再処 理工場の廃液・排水から放射性物質を除去する。

各種の物質や材料からの放射性廃棄物除去工程において変換過程(および総じて生

物系)を適用するだけでなく、きわめて高い放射化学的(および化学的)純度を持った個別的放射性同位体の製造あるいは選択的分離のために変換過程を適用することがきわめて有望であると思われる。例えば、医療分野ではテクネシウム、ガリウム、ヨウ素等の同位体が利用されているが、現在、それらを製造するためには、所要の放射 化学的純度の放射性同位体薬剤を得るためにかなり高い単位当たり費用を費やさなければならない。生物系を利用すれば、所要の放射化学的純度の放射性医薬品の製造費 用を大幅に低減することが可能になると思われる。

原子炉冷却ループの浄化といった特異な問題の解決のために生物系を利用する可能 性も、それに劣らず有望であると思われる。原子炉の稼働の過程では、苛酷な中性子 場の条件下で構造材が水媒質中に溶出する結果,著しい量(放射化学的評価による量) の放射性コバルトが形成される。この元素は原子炉の生体遮蔽区域外で密な堆積物を 形成する性質を持っている。その結果、保守要員の追加的被曝を防止するため、原子 炉の生体遮蔽区域を二次ループの所まで拡大する必要が生じる。かつて(1980年代) は、この問題は、冷却ループ内を循環する水の組成に亜鉛化合物を添加する方法によ り、全体的には満足すべき仕方で解決されていた。コバルトは亜鉛の存在下では密な 堆積物を形成せず、冷却水中にコロイド溶液の形で留まる。しかし、亜鉛の同位体の 1つ(Zn<sup>64</sup>。天然亜鉛中のその自然含有率は約50%)は、中性子による照射の結果、 コバルトの放射性同位体よりさらに高い放射能を創出する。それゆえ、冷却液の組成 には、天然亜鉛ではなく、同位体Zn<sup>64</sup>を含有しない、いわゆる「減損亜鉛[depleted zinc]] を添加しなければならない。分離されたあらゆる安定同位体と同様、それはかなり高 価な産物である。それだけでなく、亜鉛の添加は、原子炉ループの浄化と関係した、 今度はそれとは別の一連の問題を生み出す。炉心外の一次冷却ループにおける電離放 射のレベルが相対的に低く,二次冷却ループにおけるそのレベルがそれよりさらに低 いことを考慮すると、これらのループからの放射性コバルトの除去(あるいは少なく とも、放射性コバルトの密な堆積物の形成の防止)を目的とした生物系全般、とりわ け常温変換過程の適用の可能性は大きな期待を抱かせるものであるように思われる。

微生物系における放射性同位体変換現象のあり得る利用方法について、より詳しく 検討しよう。

原子炉内におけるウラン同位体U<sup>235</sup>(寿命7·10<sup>8</sup>年)の核分裂反応の過程で,長寿命 および中程度の寿命を持つ多数の放射性同位体(高レベル放射性廃棄物)が形成され る。すなわち,

Sr<sup>90</sup> (寿命 28.5 年, 原子炉から取り出した直後におけるPu<sup>239</sup>の放射能を 1 としたときの廃棄物の相対的放射能Q = 230)

Zr<sup>95</sup> (寿命 8.8 年, 0=5800) Nb<sup>95</sup> (寿命 35 年, Q = 5700) Mo<sup>99</sup> (寿命 66 時間, 0 = 6100) Ru<sup>103</sup> (寿命 39 日, Q = 3800) Ru<sup>106</sup> (寿命 368 日, Q = 860) Sb<sup>125</sup> (寿命 2.8 年, Q = 150) I<sup>131</sup> (寿命8日,Q=3100)  $Cs^{134}$ (寿命2年,0=170)  $Cs^{137}$ (寿命 30.2 年, Q = 260)  $Ce^{144}$ (寿命 285 日, Q = 3900) Eu<sup>154</sup> (寿命 8.8 年, 0 = 14) Pu<sup>238</sup> (寿命 87.7 年, Q = 1.3) Pu<sup>239</sup> (寿命 24000 年, 0 = 1)

Pu<sup>240</sup> (寿命 6550 年, Q = 1.5)

Pu<sup>241</sup> (寿命 14.4 年, Q = 180)

 $Am^{241}$  (寿命 432 年, Q = 0.16)

ウラン1kg当たりの1日の平均燃焼を11MWとしたときの照射済燃料中における 長寿命および中程度の寿命を持つ主な核分裂片と超ウラン元素の蓄積に関する平均的 データを表 7.1 に示す。

表	7.	1

放射性	放射能,	電告レイナン半径	放射性核種の
核種	Bq	电何とイオン十住	立体化学的アナログ
Sr <sup>90</sup>	$2 \sim 4 \cdot 10^{17}$	$Z = +2$ , $R = 1.2 \pm 0.07$ Å	$Ca^{2+} Eu^{2+} Hg^{2+} Sm^{2+}$
Zr <sup>95</sup>	$5 \sim 9 \cdot 10^{18}$	$Z = +4$ , $R = 0.8 \pm 0.03$ Å	$Hf^{4+} La^{4+} Nb^{4+}$
Nb <sup>95</sup>	$5 \sim 9 \cdot 10^{18}$	$Z = +4$ , $R = 0.72 \pm 0.05$ Å	Mo <sup>4+</sup> Os <sup>4+</sup> Se <sup>4+</sup> Sn <sup>4+</sup> W <sup>4+</sup>
		$Z = +5$ , $R = 0.68 \pm 0.02$ Å	Sb <sup>5+</sup> Bi <sup>5+</sup> Ta <sup>5+</sup>
Mo <sup>99</sup>	$5 \sim 9 \cdot 10^{18}$	$Z = +4$ , $R = 0.67 \pm 0.01$ Å	Ir <sup>4+</sup> Nb <sup>4+</sup> Pd <sup>4+</sup> Pt <sup>4+</sup>
		$Z = +6$ , $R = 0.66 \pm 0.03$ Å	W <sup>6+</sup>
Ru <sup>103</sup>	$4 \sim 8 \cdot 10^{18}$	Z = +3, $R = 0.77$ Å	Ir <sup>3+</sup> Mn <sup>3+</sup> Rh <sup>3+</sup>
		$Z = +4$ , $R = 0.63 \pm 0.02$ Å	Ir <sup>4+</sup> Mo <sup>4+</sup> Nb <sup>4+</sup> Os <sup>4+</sup> Tl <sup>4+</sup> W <sup>4+</sup>
Ru <sup>106</sup>	$1 \sim 2 \cdot 10^{18}$	Z = +3, $R = 0.77$ Å	Ir <sup>3+</sup> Mn <sup>3+</sup> Rh <sup>3+</sup>
		$Z = +4$ , $R = 0.63 \pm 0.02$ Å	Ir <sup>4+</sup> Mo <sup>4+</sup> Nb <sup>4+</sup> Os <sup>4+</sup> Tl <sup>4+</sup> W <sup>4+</sup>
Sb <sup>125</sup>	$1 \sim 3 \cdot 10^{16}$	Z = +3, R = 0.9 Å	$Au^{3+} In^{3+} Lu^{3+}$
		Z = +5, $R = 0.62$ Å	Ta <sup>5+</sup>
I <sup>131</sup>	$3 \sim 5 \cdot 10^{18}$	Z = +5, $R = 0.94$ Å	Pa <sup>5+</sup> U <sup>5+</sup>
		$Z = -1$ , $R = 2.2 \pm 0.02$ Å	$SH^{-1}MSO_4^{-1}$
Cs <sup>134</sup>	$1 \sim 4 \cdot 10^{17}$	$Z = +1, R = 1.65 \pm 0.02 Å$	Fr <sup>1+</sup> K <sup>1+</sup> NH <sup>1+</sup> Rb <sup>1+</sup>
Cs <sup>137</sup>	$3 \sim 5 \cdot 10^{17}$	$Z = +1, R = 1.65 \pm 0.02 Å$	Fr <sup>1+</sup> K <sup>1+</sup> NH <sup>1+</sup> Rb <sup>1+</sup>
Ce <sup>144</sup>	$3 \sim 6 \cdot 10^{18}$	$Z = +3, R = 1.1 \pm 0.08 Å$	Bi <sup>3+</sup> Gd <sup>3+</sup> La <sup>3+</sup> Nd <sup>3+</sup> Pa <sup>3+</sup> Pr <sup>3+</sup>
			Th <sup>3</sup>
		$Z = +4$ , $R = 0.95 \pm 0.07$ Å	La <sup>4+</sup> Pa <sup>4+</sup> Te <sup>4+</sup>
Eu <sup>154</sup>	$1 \sim 3 \cdot 10^{16}$	Z = +2, R = 1.19  Å	$Hg^{2+} Pb^{2+} Yb^{2+}$
		$Z = +3, R = 1.07 \pm 0.1 Å$	Bi <sup>3+</sup> Ce <sup>3+</sup> Dy <sup>3+</sup> Nd <sup>3+</sup> Pa <sup>3+</sup> Sm <sup>3+</sup>
			Tb <sup>3+</sup> Th <sup>3+</sup> Tm <sup>3+</sup> Tl <sup>3+</sup> Y <sup>3+</sup> Yb <sup>3+</sup>
Pu <sup>238</sup>	$1 \sim 2 \cdot 10^{15}$	$Z = +3$ , $R = 1.02 \pm 0.01$ Å	Dy <sup>3</sup> Ho <sup>3+</sup> Nd <sup>3+</sup> Pa <sup>3+</sup> Tb <sup>3+</sup> Tm <sup>3+</sup>
			U <sup>3+</sup> Y <sup>3+</sup> Yb <sup>3+</sup>
		$Z = +4$ , $R = 0.88 \pm 0.02$ Å	La <sup>4+</sup> Pa <sup>4+</sup> Te <sup>4+</sup> Zr <sup>4+</sup>
		Z = +5, $R = 0.87$ Å	Pa <sup>5+</sup>
Pu <sup>239</sup>	$1 \sim 2 \cdot 10^{15}$	$Z = +3$ , $R = 1.02 \pm 0.01$ Å	Dy <sup>3+</sup> Ho <sup>3+</sup> Nd <sup>3+</sup> Pa <sup>3+</sup> Tb <sup>3+</sup> Tm <sup>3+</sup>
			U <sup>3+</sup> Y <sup>3+</sup> Yb <sup>3+</sup>
		$Z = +4$ , $R = 0.88 \pm 0.02$ Å	La <sup>4+</sup> Pa <sup>4+</sup> Te <sup>4+</sup> Zr <sup>4+</sup>
		Z = +5, $R = 0.87$ Å	Pa <sup>5+</sup>
Pu <sup>240</sup>	$1 \sim 2 \cdot 10^{15}$	$Z = +3$ , $R = 1.02 \pm 0.01$ Å	Dy <sup>3+</sup> Ho <sup>3+</sup> Nd <sup>3+</sup> Pa <sup>3+</sup> Tb <sup>3+</sup> Tm <sup>3+</sup>
			U <sup>3+</sup> Y <sup>3+</sup> Yb <sup>3+</sup>
		$Z = +4$ , $R = 0.88 \pm 0.02$ Å	La <sup>4+</sup> Pa <sup>4+</sup> Te <sup>4+</sup> Zr <sup>4+</sup>
		Z = +5, $R = 0.87$ Å	Pa <sup>5+</sup>

Pu <sup>241</sup>	$1 \sim 2 \cdot 10^{17}$	$Z = +3$ , $R = 1.02 \pm 0.01$ Å	Dy <sup>3+</sup> Ho <sup>3+</sup> Nd <sup>3+</sup> Pa <sup>3+</sup> Tb <sup>3+</sup> Tm <sup>3+</sup>
			U <sup>3+</sup> Y <sup>3+</sup> Yb <sup>3+</sup>
		$Z = +4$ , $R = 0.88 \pm 0.02$ Å	La <sup>4+</sup> Pa <sup>4+</sup> Te <sup>4+</sup> Zr <sup>4+</sup>
		Z = +5, $R = 0.87$ Å	Pa <sup>5+</sup>
Am <sup>241</sup>	$1 \sim 2 \cdot 10^{14}$	$Z = +3$ , $R = 1.0 \pm 0.01$ Å	Dy <sup>3+</sup> Ho <sup>3+</sup> Nd <sup>3+</sup> Pa <sup>3+</sup> Tb <sup>3+</sup> Tm <sup>3+</sup>
			U <sup>3+</sup> Y <sup>3+</sup> Yb <sup>3+</sup>
		$Z = +4$ , $R = 0.87 \pm 0.02$ Å	La <sup>4+</sup> Pa <sup>4+</sup> Te <sup>4+</sup> Zr <sup>4+</sup>
Am <sup>244</sup>	$2 \sim 4 \cdot 10^{14}$	$Z = +3$ , $R = 1.0 \pm 0.01$ Å	Dy <sup>3+</sup> Ho <sup>3+</sup> Nd <sup>3+</sup> Pa <sup>3+</sup> Tb <sup>3+</sup> Tm <sup>3+</sup>
			U <sup>3+</sup> Y <sup>3+</sup> Yb <sup>3+</sup>
		$Z = +4$ , $R = 0.87 \pm 0.02$ Å	La <sup>4+</sup> Pa <sup>4+</sup> Te <sup>4+</sup> Zr <sup>4+</sup>

表 7.1 に示されているのは熱中性子炉の場合に燃料が平均的に燃焼したときの核分 裂生成物の組み合わせとその内容である。高速中性子炉の場合には、核分裂片の組み 合わせはそれとは若干異なり、より寿命の長い放射性核種と超ウラン元素の割合が増 大する側にシフトする。この表に示されているのは主な核分裂片の元素のみであるが、 これらの元素が冷却プールに 2~3 年間保管された後における照射済燃料の総残留放 射能の 99.9%以上を占めている。この表には放射性原子核の立体化学的アナログも示 されている。これらの立体化学的アナログは、任意の組み合わせで放射性原子核の代 替となる(またはそれらによって代替される)ことができる。

放射性廃棄物の最も効率的な処理方法の1つは、リサイクルを目的としてそれらの 廃棄物から未使用の核燃料を分離してすることである。

高レベル放射性廃棄物の処理およびそれに続くリサイクルの際の主な問題は、それ らの中には、(再生プロセス後に再び原子力発電所用燃料要素として利用することが 可能な主な「燃料用」同位体であるU<sup>235</sup>,Pu<sup>240</sup>,Pu<sup>239</sup>と比べて)寿命が相対的に短い高 レベル放射性同位体、すなわちZr<sup>95</sup>,Nb<sup>95</sup>,Ru<sup>103</sup>,Ru<sup>106</sup>が存在していることと関係して いる。これらの同位体は使用済燃料中において比較的小さい質量割合しか占めていな いが、しかし使用済燃料の放射能に著しい寄与を与えている。それらによって創出さ れる放射線照射は、使用済燃料の再生、そして原子炉で再び利用するのに適した「通 常の燃料用同位体」(U<sup>235</sup>およびすべてのプルトニウム同位体)のそこからの分離を妨 げる要因となっている。

極限的な放射線耐性(1~10 Mrad 以上の線量負荷の下で正常な代謝を行う能力)を 持つ Deinococcus Radiodurans タイプの微生物培養物およびそれよりはるかに小さい とは言え 30 krad 以上の線量負荷に耐える能力を持つ培養物の増殖時における,放射 性廃棄物の多成分系組成物からの特定のタイプの低濃度高レベル放射性同位体の分離 プロセスは,同一元素の相異なる同位体の化学特性,またそれらが生命活動過程に関 与する能力が事実上互いに異なっていないということに立脚している。その結果,増 殖中の培養物は,その生命活動過程(代謝過程)を形成するために培地中に存在する 放射性同位体を利用する能力を持っている。

それだけでなく、放射性同位体は生物体の代謝において重要な意味を持っているというデータが存在する。そのような予想は既にヴェルナツキーによって初めて述べられていたが、その後、現代の研究によって裏づけられた。例えば、文献(Sobotovich, 1994)においては、微小真菌 [micromycete] は高レベル放射性の原子炉用黒鉛のような一見したところ不活性な基質を構成代謝において利用する能力を持っていることが示されている。*Thiobacillus ferrooxidans* 培養物はウランをエネルギー代謝において電子供与体として利用していることが実験的に証明された(Soljanto, 1980)。このことは、とりわけ、生物系の正常な生命活動過程にとって培地の個別的な微量元素組成の選択

が重要な意味を持っていることをあらためて証明している。

増殖中の放射線耐性生物培養物中において高レベル放射性不純物を安定同位体に選 択的に変換する過程においてそれらの不純物を抽出するための可能なスキームについ て検討しよう。

ここで検討されているすべての高レベル放射性廃棄物は(質量数の点で)中間的な 同位体であるから,それらの変換(融合)過程は,融合された後,増殖中の培養物に よって直ちに代謝過程に引き入れられるべき元素が,リサイクルされる同位体より重 いものになるような原子核変換スキームに従った場合にのみ進行することができる。

このような基本的要件にもとづき,放射性廃棄物の以下の変換反応を提案すること ができる。

#### 7.3.1. 長寿命同位体Sr<sup>90</sup>のリサイクルのための反応

微生物培養物の増殖に必要とされる標準的培地へのホウ素含有塩の添加はエネルギー的に有利なストロンチウム変換反応の進行の可能性をもたらし、この反応が増殖中の培養物によるモリブデンの不安定短寿命同位体の形成と吸収をもたらす。

## $Sr^{90} + B^9 = Mo^{99}$

この同位体は微生物培養物の代謝過程に引き入れられた後,66 時間の間に崩壊する。このリサイクルスキームにおいて,放射線耐性培養物は具体的な超寿命同位体を 短寿命同位体に変換することにより,その同位体を加速的に非放射化するという課題 を実際に遂行する。

#### 7.3.2. 放射性同位体Zr<sup>95</sup>のリサイクルのための反応

この反応は培地中にヘリウムが存在するとき(例えばヘリウムが強制通気されると き)に進行することができ,エネルギー的に有利な反応

 $Zr^{95} + He^4 = Mo^{99}$ 

をもたらす。これによって増殖中の培養物によるモリブデンの不安定短寿命同位体の 形成と吸収が行われる。この同位体は 66 時間の寿命を持ち,培養物による吸収後に 崩壊する。

## 7.3.3.Nb<sup>95</sup>のリサイクルのための反応

高レベル放射性同位体Nb<sup>95</sup>のリサイクルのための反応

 $Nb^{95} + p^1 = Mo^{96}$ 

が進行するためには培地中に(他の必須成分とともに)水素原子が存在すれば十分で ある。水素は必須化学元素に属するので,この要件は常に満たされる。反応結果は安 定同位体Mo<sup>96</sup>であり,この同位体は微生物培養物の代謝過程に引き入れられる。

### 7.3.4. 高レベル放射性同位体Ru<sup>103</sup>およびRu<sup>106</sup>のリサイクルのための反応

Ru<sup>103</sup>およびRu<sup>106</sup>のリサイクルのための反応は,きわめて希少なスズ同位体Sn<sup>115</sup>およびSn<sup>117</sup>(自然含有率は 0.4%および 2.4%)の形成

 $Ru^{103} + C^{12} = Sn^{115} (0.4\%)$ 

 $Ru^{106} + C^{12} = Sn^{118} (2.4\%)$ 

を伴って進行することができ、培地の組成中における炭素の存在を必要とする。炭素 は培養物の増殖に必須な元素に属し、したがって必ず培地の組成に含まれるので、こ の要件は常に満たされる。この放射性同位体のリサイクルスキームはSr<sup>90</sup>のリサイク ルスキームと類似している。

### 7.3.5. 高レベル放射性原子核Sb<sup>125</sup>のリサイクルのための反応

この同位体のリサイクルのための反応

 $Sb^{125} + B^{10} = Ba^{135}$  (6.6%)

 $Sb^{125} + B^{11} = Ba^{136}$  (8%)

は、放射線耐性培養物(例えば Deinococcus Radiodurans 培養物)の増殖時において、 培地中にホウ素塩が存在し、バリウム塩が存在しない場合に進行することができる。

### 7.3.6. 高レベル放射性同位体I<sup>131</sup>のリサイクルのための反応

この同位体のリサイクルのための反応

 $I^{131} + Li^6 = Ba^{137} (11\%)$ 

 $I^{131} + Li^7 = Ba^{138} (71.7\%)$ 

は、普通の成分の他に、リサイクルされる同位体I<sup>131</sup>およびリチウム塩も含有する培地 をベースとする *Deinococcus Radiodurans* タイプの放射線耐性培養物中において進行 することができる。

この方法は,使用済核燃料に含まれる放射性同位体のリサイクルだけでなく,計量 技術や放射線滅菌技術で利用される高レベル放射性同位体の使用済放射線源のリサイ クルを行うことも可能にする。

産業においては硬γ線の高レベル放射性線源が(計測,探傷検査,地質探査のため に)広く利用されている。それらの線源は,所定の使用期限の経過後は,(放射能の低 下,線源の安全保護系の特性の悪化により)本来の用途でのそれ以上の利用に適さな いものとなる。きわめて多大な費用がかかるため,それらの線源は,安全保護系から 同位体を分離し,放射化学的な純粋化と濃縮を行う方法で再生するのにも適していな い。それらの高レベル放射性線源の埋設処分は多額の費用を要し,また環境面で危険 な結果につながるおそれがある。滅菌技術で利用されている高レベル放射性線源の使 用期限の経過後にもそれと同様の問題が生じる。

増殖中の微生物培養物中において変換し、次に放射性同位体を安定同位体(希少同 位体を含む)に変換する方法を用いてそのような同位体をリサイクルすることを可能 にする、いくつかの反応について検討しよう。

その変換過程は、相互作用する同位体より重い原子核を最終的にもたらさなければ ならない。その結果、変換される同位体の最大の原子番号は、(それと同時にエネルギ ー保存則を満たしつつ――このことは相互作用する原子核の質量欠損の増大という形 で表される――)、培養物の増殖にとって必須であり、かつ最大の原子番号と原子質量 を持っている化学元素によって決定される。そのような元素の中で最も重要なのは、 Cs と Rb (カリウムの生化学的アナログ)およびその化学特性の点でカルシウムのア ナログである Sr である。それだけでなく、最も有望な反応を選択する際は、その反応 において得られる同位体が安定同位体である、あるいは最終的な安定原子核をもたら すそれに続く諸反応の連鎖が最小なものとなる、という要求から出発することができ る。

これらの要件から出発して、微生物培養物中における同位体変換現象を用いてリサ イクルすることが可能な最も重要な高レベル放射性同位体線源のリストを下記に示す。

Co <sup>60</sup> (寿命 5.2 年)	Ar <sup>39</sup> (寿命 270 年)
Sc <sup>46</sup> (寿命 18.7 年)	Kr <sup>85</sup> (寿命 10.7 年)
Mn <sup>54</sup> (寿命 312 日)	S <sup>35</sup> (寿命 87 日)

## 7.3.7.計量・探傷検査に利用される高レベル放射性同位体Co<sup>60</sup>のリサイクルのための 反応

Co<sup>60</sup>の寿命は 5.2 年である。この同位体は滅菌,放射線写真法および計量システム において利用される硬γ線の主な線源である。この同位体のリサイクルに適合するそ の変換反応は様々なスキームに従って進行することができる。

培地中にニッケルが存在し、培養物の増殖領域に気体ネオンが存在し、カリウム塩 が存在しない場合には、そのエネルギー的に有利な融合反応は次のスキームに従って 進行することができる。

 $Co^{60} + Ne^{20} = Rb^{80}$  (寿命 30 秒)  $\rightarrow Kr^{80}(2.2\%)$ 

 $Co^{60} + Ne^{22} = Rb^{82}$  (寿命 6.3 時間)  $\rightarrow Kr^{82}$  (11.6%)

培地中にナトリウムが存在し、カルシウム塩が存在しない場合には、そのエネルギ ー的に有利な融合反応は次のスキームに従って進行することができる。

 $Co^{60} + Na^{23} = Sr^{83}$  (寿命 32 時間)  $\rightarrow Rb^{83}$  (86 日)  $\rightarrow Kr^{83}$  (11.5%)

この反応においてはストロンチウム原子核の融合が生じている。ストロンチウムは 生化学的な特性の点でカルシウムに類似しており、培養物の増殖時にその代替物とな る。

#### 7.3.8. 高レベル放射性同位体Kr<sup>85</sup>のリサイクル

この同位体はルビジウムおよびストロンチウムに最も近く,増殖中の培養物中にお ける次の反応の過程で変換されることができる。

培地がカルシウムを含有しておらず,増殖領域にヘリウムが存在しない場合には, 次の変換反応が進行することができる。

 $Kr^{85} + He^4 = Sr^{89}$  (寿命 50 日) →  $Y^{89}$ 

カリウムが乏しい培地を用いた場合には,水の陽子が関与して進行する可能性のあ るいくつかの変換反応の1つは次の形を持つ。

 $Kr^{85} + p^1 = Rb^{86}$  (寿命 18.7 日) → $Sr^{86}$  (10%)

この反応の別のバリエーションは培地の組成中における重水素の存在を要求するが、 それより良いのは、重水をベースとする液体培地を調製することである。すなわち、

 $Kr^{85} + d^2 = Rb^{87}$  (28%)

このとき、反応は無放射反応であり、付随的な電離放射線を伴わない。

#### 7.3.9. 高レベル放射性同位体Sc<sup>46</sup>のリサイクル

この同位体は比較的小さな電荷と質量数を持っており,それゆえ,代案となり得る いくつかの反応を用いて変換することができる。

培地が鉄を含有していない場合には、その変換反応はホウ素塩の存在下で進行する ことができる。ホウ素は自然形態ではB<sup>10</sup>とB<sup>11</sup>の2種類の同位体から構成されている。

 $Sc^{46} + B^{10} = Fe^{56}$  (92%)

 $Sc^{46} + B^{11} = Fe^{57}$  (2.2%)

これらの反応のうち2番目の反応はきわめて重要である。その進行の結果,高レベル放射性同位体Sc<sup>46</sup>のリサイクルという主要な課題が解決されるだけでなく,科学技術の多数の領域においてきわめて広く利用されている希少なメスバウアー同位体Fe<sup>57</sup>が形成されるからである。

### 7.3.10. 高レベル放射性同位体Mn<sup>54</sup>のリサイクル

Mn<sup>54</sup>は必須元素である鉄に最も近い同位体であり、それゆえ、鉄が欠乏している軽 水または重水をベースとする培地中における次の反応によって最も効率的に変換する ことができる。

 $Mn^{54} + p^1 = Fe^{55}$  (寿命 2 年) → $Mn^{55}$ 

 $Mn^{54} + d^2 = Fe^{56}$  (92%)

### 7.3.11. 高レベル放射性同位体Ar<sup>39</sup>のリサイクル

この同位体のリサイクルのための最も効率的な変換反応は、カリウムが欠乏している重水をベースとする液体培地中における次の反応である。

 $Ar^{39} + d^2 = K^{41}$  (6.7%)

この反応の結果は希少同位体K<sup>41</sup>である。この同位体の天然カリウム中における自然 含有率は小さく, 6.7%である。

### 7.3.12. 高レベル放射性同位体S<sup>35</sup>のリサイクル

この同位体のリサイクルのための反応

 $S^{35} + Li^7 = K^{42}$  (寿命 12 時間) → $Ca^{42}$  (0.6%)

は、カリウムが乏しく、しかしリチウム塩が添加されている培地中において行うこと ができる。この反応の結果はきわめて希少な安定同位体Ca<sup>42</sup>である。

以上において検討したリサイクル過程への補足として,さらにもう1つの事情を指 摘しなければならない。

増殖中の微生物培養物中における同位体変換現象の研究に関して行われた一連の実験において、増殖中の生物培養物が育てられている培地に陽イオンLi<sup>+</sup>,Na<sup>+</sup>,K<sup>+</sup>,Rb<sup>+</sup>,Cs<sup>+</sup>,Tl<sup>+</sup>のうちいずれか1つを添加すると、これらの元素との間における核反応のスキームとは無関係な、それ以外の元素および同位体の変換反応が著しく(およそ 1.8~2倍に)加速されることが我々によって発見された。この結果は第4章において指摘さ

れている。我々の知識の現状においては,観測されるこの現象に対して余すところの ない説明を与えることは不可能である。推測によれば,上に列挙した一価陽イオンは 電離放射線の作用に似た触媒作用(「波動触媒作用」)を及ぼしている。この効果を放 射性同位体のリサイクルプロセスの最適化のためにも利用することが可能であること は明らかである。

## 7.4. あとがき

本論において検討された諸例は、常温同位体変換効果は、きわめて広範な課題 使用済み核燃料のリサイクルの問題も含め、生活の確保に関する多数の問題、また人 間の病因論に対する新たな見方の形成——の解決に利用することができることを示し ている。

同位体と化学元素の変換という考え方自体を順次適用してゆけば、そのことは、周 囲媒質中に一連の必須多量・微量栄養素が欠如している極限的条件における場合も含 め、生体の機能に関する広範な課題の見直しをもたらす可能性がある。まさにそのよ うな課題に関する検討を行えば、ホメオパシーの若干の特徴とその説明不可能な効果 が理解できるようになるかもしれない。多数の加齢性疾患や職業性疾病の発生と病理 の特徴を、別の仕方で検討することが可能かもしれない。それらの疾患の発生原因は これまで機能障害、例えば神経系の活動と関連づけられてきたが、実際には、特定の 同位体の合成過程の効率の低下(または過剰効率)と関連しており、それが直接的に 当該の病理を引き起こしている可能性がある。

相手方分子の電荷特性と周波数分散特性の読み取りにもとづいた生体分子の相互認 識に関する問題,そしてこの問題から直接的に導き出される腫瘍学における免疫応答 と認識に関するグローバルな課題もまた,同位体と元素の変換に関する問題と併せて 検討すれば,独自の解決を見出すことができるかもしれない。その理由は,認識問題 のエネルギー的基礎をなしている相互作用エネルギーのパラメーターは,認識メカニ ズムが働いている空間的領域においては,相互作用する個別物体の表面の元素組成に 対して決定的に依存しているということにある。巨大生体分子の個別フラグメントの 遠隔作用的相互認識にもとづいた DNA の放射性および非放射性対崩壊の非酵素的自 己修復方法に関する分析と発展においては,このようなアプローチがその有効性を発 揮した (Vysotskii, Kornilova, Samoylenk, Pinchuk, 1996~2001)。

本論において検討された希少同位体および超希少同位体の合成に関する問題は、き わめて重要な意義を持っている。これらの同位体の多くは、その量がきわめて限定的 で値段が極端に高いため、今のところ利用することができない。所要の場所における 所要の同位体の局所合成の可能性との関連において、現代技術、例えば集積マイクロ エレクトロニクスや分子ナノテクノロジーの多数の課題が、これまでとは別のやり方 で解決される可能性がある。このこともまた、予想外の結果をもたらすかもしれない。

生物系における常温同位体変換過程の適用は、使用済み核燃料の既存再処理技術の 最大の弱点を解消し、従来型の方法では解決不可能な化学技術の問題も新たなやり方 で解決することを可能にする。このことは、世界各地の既設・新設の原子力発電所を 基礎として原子力産業を発展させる可能性をもたらす。これに伴い、現在蓄積されて いる環境にとって危険な原子力産業の未処理廃棄物に含まれる濃縮ウランをリサイク ルの過程に導入することにより、核燃料の潜在的蓄積量を著しく増加させることが可 能となる。

# 文 献

[この文献一覧において日本語に訳されているものはロシア語文献である。]

*Aickin R. M., Dean A. C. R., Cheetham A. K. et al.* Electron microscope studies on the uptake of lead by a *Citrobacter species // Microbios Lett.,* 1979. v. 9, N 33, pp. 7—15.

*Ainsworth M. A., Tompsett C. P., Dean A. C. R.* Cobalt and nikel sensitivity and toleranse in *Klebsiella pneumoniae // Microbios.,* 1980, v. 27, N 109—110, pp. 175—184.

*Ali L., Sloan D.* Activation of hypoxanthine / guanine phosphoribosyltransferase from yeast by divalent zinc and nickel ions // *J. Inorg. Biochem.,* 1986, v. 28, N 4, pp. 407—415.

*Alvarez L. et al. // Physical Review,* 1957, v. 105, p. 1127.

Anderman G. // in Proceedings of Cold Fusion Conference, Salt Lake City, Utah, 1990, p. 295.

Arata Y., Zhang Y. Ch. // Proceedings of ICCF-8, Lerici, 2000, pp. 11—16.

Arata Y., Zhang Y. Ch. // Fusion Technology, 1992, v. 22, pp. 287—295.

*Arata Y., Zhang Y. Ch. // Proc. Japan Acad.,* 1994, v. 70, ser. B, pp. 106—111.

Arata Y., Zhang Y. Ch. // Proc. Japan Acad., 1996, v. 72, ser. B, N 9, pp. 179—184.

*Arata Y., Zhang Y. Ch. // Proc. Japan Acad.,* 1997, v. 73, ser. B, N 1, pp. 1—6.

*Azbel M. Ya. // Solid State Commun.*, 1990, v. 76, p. 127.

*Babich H., Stotzky G.* Abiotic factors affecting the toxicity of lead to fungi // *Appl. and Environ. Microbiol.*, 1979, v. 38, N 3, pp. 506—513.

*Babich H., Stotzky G.* Compounds of water hardness, which reduce the toxicity of nickel to fungi // *Microbios. Lett.,* 1981, v. 18, N 69, pp. 17—24.

Bahcall J. N., Ulrich R. K. // Rev. Mod. Phys., 1988, v. 60, p. 297.

*Baldry M. G. C., Dean A. C. R.* Copper accumulation by *Escherichia coli* strain FE 12/5.2. Uptake by resting organisms // *Microbios. Lett.,* 1980, v. 15, N 59/60, pp. 105—111.

Baldo M., Pucci R., Bortignon P. F. // Fusion Technology, 1990, v. 18, pp. 347—350.

*Balian R., Blaizot J.-P., Bouche P. // Journ. de Physique,* 1989, v. 50, pp. 2307–2311.

*Bannister J. V., Desideri A., Rotilio G.* Replacement of Mn(III) with Cu(II) in *Bacillus stearothermophilus* superoxide dismutase. Similarity of the active site to the zinc site of copper/zinc superoxide dismutase //*FEBS Lett.*, 1985, v. 188, N 1, pp. 91—95.

Barut A. O. // Int. J. of Hydrogen Energy, 1990, v. 15, p. 907.

Basolo F., Pearson R. 無機反応のメカニズム. モスクワ, Mir, 1971, 592 p.

*Bauminger E. R., Cohen S. G., De Kanter F.* Iron storage in *Mycoplasma capricolum // J. Bacteriol.,* 1980, v. 141, N 1, pp. 378—381.

*Baxi M. D., Modi V. V.* Studies on some factors affecting molybdenum transport in cowpea *Rhizobium // Indian J. Exp. Biol.,* 1988, v. 26, N 7, pp. 543—545.

*Bazhutov Yu. N., Vereshkov G. M.* 論集『常温核融合』所収,中央機械製造研究所, 1992, pp. 22—28.

*Bazhutov Yu. N., Vereshkov G. M.* 論集『常温核融合』所収, 第1回常温核融合に関するロシア会議資料, モスクワ, 1994, pp. 23—37.

Becker E. W. // Naturwissenschaften, 1989, v. 76, p. 214.

102 文献

*Belov A. P., Davidova E. G.* 酵母 *Candida maltosa* 中におけるコバルトの細胞内分布 // 微 生物学, 1985—54, N 6, pp. 970—973.

*Beveridge T. J.* Chemical modification of the bacterial wall to determine sites of metal deposition // Electron Microsc. «9th Int. Congr. Electron Microsc.» (Toronto, 1978)—Toronto, 1878, v. 2, pp. 350—351.

*Beveridge T. J., Forsberg C. W., Doyle R. J.* Major sites of metal binding in *Bacillus licheniformis* walls // *J. Bacteriol.,* 1982, v. 150, N 3, pp. 1438—1448.

*Bhattacharjee J. K., Satpathy L. and Waghmare Y. R., Pramana // J. Phys.,* 1989, v. 32, N 6, pp. L841—L844.

Bockris J. O'M., Lin G. H., Packham N. J. C. // Fusion Technology, 1990, v. 18, pp. 11—31.

Bohm D. 量子論, 第5部第21章第36節.

*Borst-Pauwels G. W. F. H., Boxman A. W., Theuvenet A. P. R. // Biochem. et biophys. acta: Biomembranes,* 1986, v. 861—(M-142), N 3, pp. 413—419.

*Bossemeyer D., Schlösser A., Bakker E.P.* Specific cesium transport by the *Escherichia coli* Kup (formerly TkKD) potassium-uptake system // *Forum Mikrobiol.,* 1989, N 12, p. 48.

*Bostian K. A., Betts G. F., Man W. K., Hughes M. N.* Multipe binding of thallium and rubidium to potassium-activated yeast aldehyde dehydrogenase. Influences on tertiary structure, stability and catalytic activity *// Biochem. J.,* 1982, v. 207, N 1, pp. 73—80.

*Bowen H. J. M.* Trace elements in biochemistry. – London; New York: Acad. press. 1966, p. 241.

*Brahmaprakash G. P., Devasia P., Jagadish K. S.* Development of *Thiobacillus ferrooxidans* ATCC 19859 strains tolerant to copper and zinc // *Bull. Mater. Sci.,* 1988, v. 10, N 5, pp. 461—465.

*Bressani T., Del Giudice E., Preparata G. // Nuovo Cimento Soc. Ital. Fis. A.* 1989, v. 101, N 5, pp. 845—849.

Brown R. E., Jarme N. // Phys. Rev. C, 1990, v. 41, N 4, pp. 1391—1400.

*Buijs K., Choppin G. R. // J. Chem. Phys.,* 1963, v. 39, N 8, p. 2035.

*Burke B. E., Pfister R. M.* Cadmium transport by a Cd<sup>2+</sup>-sensitive and Cd<sup>2+</sup>-resistant strain of *Baccillus subtilis // Can. J. Microbiol.,* 1986, v. 32, N 7, pp. 539—542.

Bush R.T. // Transactions of Fusion Technology, 1994, v. 26, pp. 431—441.

*Bush R. T. // Fusion Technology*, 1991, v. 19, p. 313.

Bussard R. W. // Fusion Technology, 1990, v. 18, pp. 231—236.

*Callander I. J., Barford J. P.* Precipitation, chelation, and the availability of metals as nutrients in anaerobic digestion. 1. Methodology // *Biotechnol. and Bioeng.*, 1983, v. 25, N 8, pp. 1947—1957.

*Callander I. J., Barford J. P.* Precipitation, chelation, and the availability of metals as nutrients in anaerobic digestion. 2. Methodology // *Biotechnol. and Bioeng.*, 1983, v. 25, N 8, pp. 1959—1972.

*Cassandro M., Galvanoffi G., Jona-Lasserino G.* Preprint N. 672, Department of Physics, University of Rome, 1989.

*Cassity T. R., Kolodziej B. J.* Role of the capsule produced by *Bacillus megaterium* ATCC 19213 in the accumulation of metallic cations // *Microbios.*, 1984, v. 41, N 160, pp. 117—125.

103 文献

Cerofolini G. F., Re N. // A.I.P. Conference Proceedings (Provo, Utah), 1990, v. 228, p. 668.

*Chatterjee L. // Fusion Technology,* 1990, v. 18, pp. 683—685.

Chatterjee L. // Fusion Technology, 1991, v. 20, N 3, pp. 358—360.

*Chechin V. A., Tsarev V.A., Rabinowitz M. and Kim Y. E. // Int. J. Theor. Phys.,* 1994, v. 33, N 3, pp. 617—670.

*Chechin V. A., Tsarev V. A. // Fusion Technology*, 1994, v. 25, pp. 469—474.

*Christensen O. B., Ditlevsen P. D., Jacobsen K. W. et al. // Phys. Rev. B,* 1989, v. 40, N 3, pp. 1993—1996.

*Christos G. A.* // Univ. of Western Australia preprint, 1989.

*Chubb S. R., Chubb T. A. // Fusion Technology,* 1990, v. 17, p. 710.

*Chubb S. R., Chubb T. A. // Fusion Technology,* 1991, v. 20, pp. 93—99.

*Chubb S. R., Chubb T. A. // Fusion Technology*, 1993, v. 24, pp. 403—416.

*Close F.* Too Hot to Handle: The Race for Cold Fusion, W.H. Allen Publ., London, 1990.

Cohen J. S., Davies J. D. // Nature, 1989, v. 342, pp. 487—488.

*Crawford O. H. // Fusion Technology*, 1992, v. 21, pp. 161—162.

Danos M., Belyaev V. B. // Fusion Technology, 1991, v. 20, p.354.

*Danos M. // Fusion Technology,* 1990, v. 17, p. 484.

Davydov A.S. 量子力学, モスクワ, 国営物理数学文献出版所, 1963, p. 447.

Davydov A. S. // ウクライナ物理学雑誌, 1989, 第34巻, 第9号, pp. 1295—1297.

Demidenko V. S., Simakov V. I. // 高等教育機関紀要, 物理学. 1993, 第 10 号, pp. 20-30.

*Deryagin B. V., Klyuev V. A., Lipson A. G., Toporov Yu. P. //* コロイド雑誌, 1986, 第48(1)巻, pp. 12—14.

*Diels L. Mergeay M., Remacle J. et al.* Possibilities of *Alcaligenes eutrophus* CH34 highly resistant to heavy metals in biotechnology // Proc. 1th. Eur. Congr. Biotechnol. (Amsterdam, June 14—19, 1987).—Amsterdam etc., 1987, pp. 383—386.

*Dienes J. K. // Fusion Technology,* 1991, v. 19, pp. 543—546.

*Diermayr P., Kroll S., Klostermeyer H.* Influence of EDTA and metal ions on a metalloproteinase from *Pseudomonas fluorescens* biotype I // *Biol. Chem. Hoppe-Seyler*, 1987, v. 368, N 1, pp. 57—61.

*Dou D., Inagaki K., Sugio T. et al.* // Shigen-to-Sozai –J. Mining and Mater. Process. Inst. Jap., 1989, v. 105, N 7, pp. 559(49)—563(53).

*Drapeau A. J., Laurence R. A., Harbec P. S. et al.* Bio-accumulation de metaux lourds chez certains microorganismes // *Sci. et Techn.,* 1983, v. 16, N 4, pp. 359—363.

*Dufours J. J., Foos J. H., Dufours X. J. C.* in Proceedings of ICCF-7, Vancouver, 1998, pp. 113-118.

*Eastman D. E., Cashion J. K., Switendick A. C. // Phys. Rev. Lett.*, 1971, v. 27, N 1, pp. 35—38.

*Errata // J. Electroanalyt. Chem.,* 1989, v. 263, p. 187.

*Fedorovich G. V. // Phys. Scripta*, 1991, v. 44, p. 555.

*Fedorovich G. V. // Phys. Lett. A*, 1992, v. 164, p. 149.

Fedorovich G. V. // 工業物理学雑誌, 第 63 巻, 第 10 冊, p. 64.

## 104 文 献

Fedorovich G. V. // Fusion Technology, 1993, v. 23, N 4, p.442.

Fedorovich G. V. // Fusion Technology, 1994, v. 25, N 1, pp. 120-123.

Feng S. // Solid State Communications, 1989, v. 72, N 2, pp. 205-209.

Fimin N. N. // 工業物理学雑誌宛レター, 1996, 第22巻, 第5冊, pp. 17—19.

*Fisher J. C. // Fusion Technology,* 1992, v. 22, N 4, pp. 511—517.

Fleischmann M., Pons S. // Phys. Lett. A, 1993, v. 176, p. 118.

*Fleischmann M., Pons S. // Electroanalyt. Chem.,* 1989, v. 261, pp. 301—308.

Frank F. C. // Nature, 1947, v. 160, p. 525.

*Frank H. S. // Proc. Roy. Soc. A,* 1958, v. 247, N 1251, p. 481.

*Frank H. S., Wen W. Y. // Disc. Faraday Soc.,* 1957, v. 24, p. 133.

Frodl P., Rossler O. E., Hoffmann M., Wahl F. // Z. Naturforschung, 1990, v. 45a, pp. 757—758.

*Fujita S. // Phys. Satn. Sol.(b),* 1989, v. 156, pp. K17—K21.

*Fukui M., Takii S.* Reduction of tetrazolium salts by sulfate-reducing bacteria // *FEMS Microbiol. Lett.,* v. 62, N 1, pp. 13—19.

Gac K. et al. Preprint Kaliski Inst. of Plasma Physics. — Warsaw, 1989.

*Gadd G. M., Mowll J. L.* Cadmium and fungi // Heavy Metals Environ. Int. Conf. Heidelberg, Sept., 1983, Edinburgh, 1983, v. 1, pp. 326—329.

Galimov E. M. 同位体の生物学的分画の本性,モスクワ, Nauka, 1981.

*Glombitza F., Iske U., Richter K. // Mikroben als Silberwascher //*Spectrum., 1988, v. 19, N 12, pp. 10—11.

Goldanskii V. I., Dalidchik F. I. // Nature, 1989, v. 342, p. 231.

*Goldanskii V. I., Dalidchik F. I. // Phys. Lett. B,* 1990, v. 234, pp. 465—468.

Golubnichii P. I., Kurakin V. A., Filonenko A. D. et al. // ソ連科学アカデミー報告論文集.

*Golubnichii P. I., Kuzminov V. V., Merzon G. I. et al.* // 工業物理学雑誌宛レター, 1991, 第53 巻, 第2冊, pp. 115—118.

*Golubnichii P. I., Tsarev V. A., Chechin V. A.* // ソ連科学アカデミー物理学研究所プレプリント, 1989, 第 149 号.

*González-Martin A., Bhardwaj R. C., Bockris J. O'M. // J. Applied Electrochemistry,* 1993, v. 23, N 6, p. 531.

*Gordzhyan I. Kh., Kats L. N.* 偏性嫌気性菌細胞中におけるデヒドロゲナーゼ活性の局在化 // ソ連科学アカデミー報告論文集, 1970, 195, 第4号, pp. 696—971.

Greenland P. T. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 1990, v. 23, pp. 1679—1690.

*Gryzinski M.* // A.I.P. Conf. Proceedings (Provo, Utah), 1990, v. 228, p. 717.

Hagelstein P. L. // A.I.P. Conf. Proceedings (Provo, Utah), 1990, v. 228, p. 734.

*Hagelstein P. L.* // Italian Phys. Society Conf. Proceedings, 1991, v. 33, p. 205.

Hagelstein P. L. // Proceedings of ICCF-3, Nagoya, Japan, 1992, p. 297.

Hagelstein P. L. // Fusion Technology, 1993, v. 23, p. 353.

Hagelstein P. L. // Proceedings of ICCF-7, Vancouver, Canada, 1998, pp. 140—146.

Hagelstein P. L. // Transactions of Fusion Technology, 1994, v. 26, pp. 461—473.

105 文 献

Harrison E. R. // Proc. Phys. Soc., 1964, v. 84, N 2, p. 213-229.

Hora H., Cicchitelli L., Miley G. H. et al. // Nuovo Cimento D, 1990, v. 12, N 3, p. 393.

Hora H., Kelly J. C., Patel J. U. et al. // Phys. Lett. A, 1993, v. 175, N 2, p. 138.

*Hora H., Miley G. H., Kelly J. C., Narne Y. //* Proceedings of ICCF-7, Vancouver, 1998, pp. 147—151.

Hughes M. 生物過程の無機化学, モスクワ, Mir, 1983, 414 p.

*Huizenga J. R.* Cold Fusion: the scientific fiasco of the century, 1993, New York: Oxford University Press.

Ichimaru S., Nakano A., Ogata Sh. et al. // J. Phys. Soc. Jpn., 1990, v. 59, N 4, pp. 1333—1340.

Ichimaru S., Ogata Sh., Nakano A. // J. Phys. Soc. Jpn., 1990, v. 59, N 11, pp. 3904—3915.

Ichimaru S. // Rev. of Modern Physics, 1993, v. 65, N 2, pp. 255—299.

*Ichimaru S.* // Physics of plasmas, 1999, v. 6, N 7, pp. 2649—2671.

*Ilyaletdinov A. N.* 微生物およびその生命活動の産物による金属固定 // 第 1 回全連邦会 議「水浄化の微生物学」,報告論文集,キエフ, Nauk.dumka, 1982, pp. 27—29.

*Iske U.* Möglichkeiten Biotechnologischer Wirkprinsipien zur Werstoffruchgewinnung und Umweltentlastung // Leder, Schuhe, Lederwaren, 1989, v. 24, N 1, pp. 27—31.

*Istomin Yu. A., Kaliev K. A. //* 論集『常温核融合』所収, 第2回常温核融合と核変換に関するロシア会議資料, ソチ.

Iwamura Y. et. al. // Proceedings of ICCF-8, Lerici, 2000, pp. 141—146.

*Jack T. R., Mistry G.* Accumulation of manganese by log phase cells of *Bacillus brevis* // *Microbios Lett.*, 1979, v. 11, pp. 19—25.

*Jändel M. // Fusion Technology*, 1990, v. 17, pp. 493—499.

*Janas R. B.* Acute copper and cupric ion toxicity in an estuarine microbial community // *Appl. and Environ. Microbiol.,* 1989, v. 55, N 1, pp. 43—49.

*Jones H. E., Trudinger P. A., Chambers L. A. et al.* Metal accumulation by bacteria with particular reference to dissimilatory sulphate-reducing bacteria // *Z. allg. Mikrobiol.,* 1976, v. 16, N 6, pp. 425—435.

Jones S. E., Palmer E. P., Czirr J. B. et al. // Nature, 1989, v. 338, pp. 737—740.

Jorne J. // Fusion Technology, 1990, v. 18, pp. 519—522.

*Joyce C.* // New Scientist, 1989, N 1671, p. 34.

*Julien J. //* Annales Scientifiques d l'Université de Besançon, 2a Serie Zoologie fasc. 13—1959.

Kalinin F. L., Lobov V. P., Zhidkov V. A. // 生化学便覧, キエフ, Nauk. dumka, 1971, 1013 p.

*Karabut A. B., Kucherov Ya. R., Savvatimova I. B.* //Proceedings of ICCF-3, Nagoya, Japan, 1992, pp. 165—168.

Karabut A. B., Kucherov Ya. R., Savvatimova I. B. // Phys. Lett. A, 1992, v. 170, p. 265.

*Karabut A. B., Kucherov Ya. R., Savvatimova I. B.* // 工業物理学雑誌宛レター, 1990, 第16巻, 第12冊, pp. 53—57.

*Karabut A. B., Kucherov Ya. R., Savvatimova I. B. //* 論集『常温核融合』所収, 第1回常温核 融合に関するロシア会議資料, モスクワ, 1994, p. 124.

Karasevskii A. I., Matyushov D. V., Gorodyskii A. V. // ウクライナ化学雑誌, 1989, 第55巻,

106 文献

第 210 号, pp. 1036—1039.

*Kasan H. C.* Detection of zinc in bacteria by light microscopy // *Microbios. Lett.*, 1988, v. 37, N 147/148, pp. 137—140.

*Kasparova S. G., Davidova E. G.* 酵母細胞中におけるコバルトイオンの吸収と輸送 // 全連邦会議「微生物代謝の調節」(プシチノ, 1989 年 6 月 12—14 日), プシチノ, 1989, p.98. *Kazachkovskii O. D. //* 原子エネルギー, 1996, 第 81 巻, 第 4 冊, p. 309.

*Kenny J. P. // Fusion Technology*, 1991, v. 19, pp. 547—551.

*Kervran C. L.* Transmutations Biologiques: Métabolismes Aberrants de l'Azote, le Potassium et le Magnésium, Librairie Maloine S.A., Paris, 1963.

*Kervran C. L.* A la Découverte des Transmutations Biologiques, Librairie Maloine S.A., Paris, 1966.

*Kervran C. L.* Preuves Relatives à l'Existence de Transmutations Biologiques, Librairie Maloine S.A., Paris, 1968.

Kervran C. L. Biological Transmutations, Happiness Press, USA, Magalia, California, 1998.

*Kihn J. C., Dassargues Ch. M., Mestdagh M. M.* Preliminary ESR study of Mn(II) retention by the yeast *Saccharomyces // Can. J. Microbiol.,* 1988, v. 34, N 11, pp. 1230—1234.

Kim Y. E., Zubarev A. L. // Proceedings of ICCF-8, Lerici, 2000, pp. 375—384.

*Kim Y. E. // Fusion Technology,* 1990, v. 17, p. 507.

*Kim Y. E.* // Proceedings of IEEE 13 Symp. on Fusion Eng., Knoxville, TN, USA, 1989, v. 1, pp. 116—119.

*Kim Y. E., Yoon J. H., Zubarev A. L., Rabinowitz M. // Transactions of Fusion Technology,* 1994, v. 26, pp. 408—413.

*Kim Y. E., Zubarev A. L. // Mod. Phys. Lett. B,* 1993, v. 7, N 24—25, p. 1627.

*Kim Y. E.* // A.I.P. Conference Proceedings (Provo, Utah), 1990, v. 228, p. 807.

*Kim Y. E. // Fusion Technology,* 1991, v. 19, pp. 558—566.

*Kim Y. E., Rice R. A., Chulick G. S. // Fusion Technology,* 1991, v. 19, pp. 174—177.

*Kim Y. E., Zubarev A. L. // Fusion Technology,* 1994, v. 25, pp. 475—477.

*Kinoshita S., Kakizono T., Kadota K. et al.* Purification of two alcohol dehydrogenases from *Zymomonas mobilis* and their properties // *Appl. Microbiol. and Biotechnol.,* 1985, v. 2, N 4, pp. 249—254.

*Kirkinskii V. A., Novikov Yu. A. //* 常温核融合の理論的モデル化,プレプリント,ノヴォシ ビルスク, 1998.

*Klyuev V.A, Lipson A. G., Toporov Yu. P., Deryagin B. V.* // 工業物理学雑誌宛レター, 1986, 第 12 巻, 第 21 冊, pp. 1333—1337.

*Komaki H.* Augmentât, du potass. en milieu sodique par des micro-organ., Rev. Pathol. Comparée, Paris, avril 1967.

*Komaki H.* // Frontiers of Cold Fusion, Proc. Third International Conference on Cold Fusion, 1992, pp. 555—558.

*Komaki H.* Sur la formation de sels de potassium par les levures et moisissures, Rev. Pathol. Comparée, Paris, sept. 1965.

Komarov V. V., Melsheimer O., Popova A. M. // Z. Naturforschung, 1990, v. 45a, N 2, pp. 759-

107 文 献

761.

*Koonin S. E., Nauenberg M. // Nature,* 1989, v. 339, pp. 690—691.

*Kozima H. // Nuovo Cimento,* 1994, v. 107 A, N 9, pp. 1781—1783.

*Krasnoshchekov Yu. I., Larionov L. V., Makovei V. A., Muryshev E. Yu., Syreykov G. I. //* ソ連科 学アカデミー報告論文集, 1991, 第 320 巻, 第 6 号, pp. 1358—1360.

*Kropf D. L., Harold F.* Selective transport of nutrients via the rhizoids of the water mold *Blastocladiella emersonii // J. Bacteriol.,* 1982, v. 151, N 1, pp. 429—437.

*Kühne R. W. // Fusion Technology*, 1994, v. 25, pp. 198—202.

*Kurek E.* Effect of bacterial biomass on cadmium concentration in liquid medium and its toxicity towards bacteria // *Zbl. Microbiol.*, 1989, v. 144, N 1, pp. 47—52.

*Laddaga R. A., Bessen R., Silver S.* Cadmium-resistant mutant of *Bacillus subtilis* 168 with reduced cadmium transport // *J. Bacteriol.,* 1985, v. 162, N 3, pp. 1106—1110.

*Laddaga R. A., Silver S.* Cadmium uptake in *Escherichia coli* K-12 // *J. Bacteriol.,* 1985, v. 162, N 3, pp. 1100—1105.

*Laube V. M., McKenzie C. N., Kushner D. J.* Strategies of response to copper, cadmium, and lead by a blue-green and a green alga // *Can. J. Microbiol.*, 1980, v. 26, N 11, pp. 1300—1311.

Leggett A. J., Baym G. // Phys. Rev. Lett., 1989, v. 63, N 2, p. 191.

*Leggett A. J., Baym G. // Nature,* 1989b, v. 340, pp. 45—46.

*Levi B.* // *Phys. Today,* 1989, v. 42, N 6, p. 19.

*Li X. Z. // Transactions of Fusion Technology*, 1994, v. 26, pp. 480—485.

*Liberman E., Reddy P., Gazdar C., Peterkofsky A.* The *Escherichia coli* adenylate cyclase compex. Stimulation by potassium and phosphate // *J. Biol. Chem.,* 1985, v. 260, N 7, pp. 4075—4081.

*Lin G. H., Kainthla R. C., Packham N. J. C. et al. // Int. J. Hydrogen Energy,* 1990, v. 15, N 8, pp. 537—550.

*Lin G. H., Kainthla R. C., Packham N. J. C., Bockris J. O'M. // J. Electroanal. Chem.,* 1990, v. 280, N 1, pp. 207—211.

*Lipson A. G., Sakov D. M., Saunin E. I.* // 実験・理論物理学雑誌, 1993, 第 103 巻, 第 6 号, pp. 2142—2153.

*Lipson A. G., Sakov D. M.* 第2回常温核融合と核変換に関するロシア会議資料,ソチ, 1994, モスクワ, 1995, pp. 193—199.

*Liu F. S. // Mod. Phys. Lett. B,* 1996, v. 10, N 23, pp. 1129—1132.

*Liu F., Rao B. K., Khanna S. N., Jena P. // Solid State Communications,* 1989, v. 72, N 9, pp. 891—894.

*Lundie L. L. (Jr), Yang H., Heinonen J. K. et al.* Energy-dependent high-affinity transport of nickel by the acetogen *Clostridium thermoaceticum // J. Bacteriol.,* 1988, v. 170, N 12, pp. 5705—5708.

Lur'e Yu. Yu. 分析化学便覧, モスクワ, Khimiya, 1979, 480 p.

*Macaskie L. E., Dean A. C. R., Cheetham A. K.* Cadmium accumulation by a *Citrobacter sp.*: the chemical nature of the accumulated metal precipitate and its location on the bacterial cells // *J. Gen. Microbiol.,* 1987, v. 133, N 3, pp. 539—544.

108 文献

*Magos L., Tuffery A. A., Clarkson T. W.* Volatilization of Mercury by bacteria // *British Journal of Industrial Medicine,* October 1964, pp. 294—298.

Maly J. A., Vávra J. // Fusion Technology, 1993, v. 24, p. 307.

*Markwell S. P., Anderson R. L.* Pathway of galactitol catabolism in *Klebsiella pneumoniae* : oxidation of L- galactitol-1-phosphate by a NAD-specific dehydrogenase // *Arch. Biochem. and Biophys.,* 1981, v. 209, N 2, pp. 592—597.

*Matsumoto T. // Fusion Technology,* 1989, v. 16, pp. 532—534.

*Matsumoto T. // Fusion Technology,* 1990, v. 18, pp. 647–651.

*Matsumoto T. // Fusion Technology*, 1991, v. 19, pp. 2125—2130.

*Mayer F. J., Reitz J. R. // Fusion Technology,* 1991a, v. 19, pp. 552—557.

Mayer F. J., Reitz J. R. // Fusion Technology, 1991b, v. 20, pp. 367—372.

*Mazitov R. K.* // ソ連科学アカデミー報告論文集, 1989, 第 307 巻, 第 5 号, pp. 1158—1160.

Moizhes B. Ya. // 工業物理学雑誌宛レター, 1991, 第17巻, 第15冊, pp. 15—17.

Morrison D. R. // 物理科学の成果, 1991, 第161巻, 第12号, pp. 129—140.

*McCready R. G. L., Din G. A., Krouse H. R.* The effect of pantothenate on sulfate metabolism and sulfur isotope fractionation by *Saccharomyces cerevisiae // Can. J. Microbiol.,* 1979, v. 25, N 10, pp. 1139—1144.

*McKubre M. et al.* // Proceedings of ICCF-8, Lerici, 2000, pp. 3—10.

*McKubre M., Bush B., Crouch-Baker S. et al.* // Proceedings of ICCF-4, Lahaina, Maui, 1994a, p. 5.

*McKubre M., Crouch-Baker S., Hauser A. K. et al.* // in Proceedings of ICCF-5, Monte-Carlo, Monaco, 1995, p. 17.

*McKubre M., Crouch-Baker S., Riley A. M. et al.* // Proceedings of ICCF-3, Nagoya, Japan, 1992, "Frontiers of Cold Fusion", (H. Ikegami, ed.), p. 5.

*McKubre M., Crouch-Baker S., Rocha-Filho R. C. et al. // J. Electroanal. Chem.,* 1994b, v. 368, p. 55.

*McKubre M., Crouch-Baker S., Tanzella F. //* 第3回常温核融合・核変換に関するロシア会議, ソチ, 1995, モスクワ; 1996, pp. 123—147.

*McKubre M., Rocha-Filho R. C., Smedley S. I. et al.* //Proceedings of Second Annual Conference on Cold Fusion, Como, Italy, 1991, "The Science of Cold Fusion", v. 33, (T. Bressani, E. Del Giudice, G. Preparata, eds), p. 419.

*McKubre M. C. H., Rocha-Filho R. C., Smedley S. I. et al.* // Proceedings of Cold Fusion Conference, Salt Lake City, Utah, 1990, p. 20.

*McNally J. R. // Fusion Technology*, 1989, v. 16, pp. 237—239.

*Miles M. H. et al.* // roceedings of ICCF-8, Lerici, 2000, pp. 105—119.

*Miles M. H., Bush B. F., Johnson K. B. // Infinite Energy*, 1997, v. 15—16, pp. 35—59.

*Miles M. H., Bush B. F., Lagowski J. J. // Fusion Technology,* 1994, v. 25, pp. 478—486.

*Miles M. H., Bush B. F., Stilwell D. E. // J. Phys. Chem.,* 1994, v. 98, pp. 1948—1952.

*Miles M. H., Bush B. F. // Transactions of Fusion Technology,* 1994, v. 26, pp. 156—159.

Miles M. H., Hollins R. A., Bush B. F., Lagowski J. J. // J. Electroanal. Chem., 1993, v. 346, pp. 99-
117.

*Miles M. H., Park K. H., Stilwell D. E. // J. Electroanal. Chem.,* 1990, v. 296, pp. 241—254.

*Mills R. L., Kneizys S. P. // Fusion Technology*, 1991, v. 20, p. 65.

*Mills R. L., Farrell J. J.* The Grand Unified Theory (Science press, Ephrata, Pennsylvania, USA), 1990.

*Mintmire J. W., Dunlap B. I., Brenner D. W. et al. // Phys. Lett. A*, 1989, v. 138, pp. 51—54.

*Morrison D. R. O. // Phys. Lett. A*, 1994, v. 185, pp. 498—502.

*Morrison D. R. O. // Transactions of Fusion Technology*, 1994, v. 26, pp. 48—54.

*Naidu C. K., Ramachandra R. T.* Protection of cadmium toxicity to *Bacillus cereus. Escherichia coli* and *Aspergillus niger // Zbl. Mikrobiol.,* 1988, v. 143, N 5, pp. 383—387.

Nedospasov A. V., Mudretskaya E. V. // Fusion Technology, 1997, v. 31, pp. 121—122.

*Nefedov V. I. //* ソ連科学アカデミー通報, 1991, 第1巻, pp. 49—60.

*Némethy G., Scheraga H. A. // J. Chem. Phys.,* 1962, v. 36, N 12, p. 3382.

*Nordlander P., Nørskov J. K., Besenbacher F., Myers S. M. // Phys. Rev. B,* 1989, v. 40, N 3, pp. 1990—1992.

*Norris P. R., Kelly D. P.* Accumulation of cadmium and cobalt by *Saccharomyces cerevisiae* // *J. Gen. Microbiol.*, 1977, v. 99, N 2, pp. 317—324.

*Ohtake H., Silver S.* The mechanism for plasmid-determined chromate resistance in *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas aeruginosa //* Abstrs Annu. Meet. Amer. Soc. Microbiol., 1987, 87<sup>th</sup> Annu. Meet. (Atlanta, Ga, 1—6 March, 1987), —Washington D. C., 1987, p. 292.

*Oppenheimer R., Phillips M. // Phys. Rev.,* 1935, v. 48, p. 500.

Paneth F. // Nature, 1927, v. 119, p. 706.

Paneth F., Peters K. // Nature, 1926, v. 118, p. 526.

Paneth F., Peters K. // Naturwissenschaften, 1926, v. 14, p. 956.

*Pan-Hou Hidemitsu S., Imura N.* Involvement of mercury methylation in microbial mercury detoxication // *Arch. Microbiol.*, 1982, v. 131, N 2, pp. 176—177.

Paolo P. // Nature, 1989, v. 338, p. 711.

*Park M. H., Wong B. B., Lusk J. E.* Mutants of *Escherichia coli* altered in transport of manganous ions // Abstrs. Annu. Meet. Amer. Soc. Microbiol. (Atlantic City, N. Y., 1976), — Washington D. C., 1976, p. 154.

Patterson J. A., US Patent 5,318,675, June 7, 1994.

Patterson J. A., US Patent 5,372,688, Dec. 13, 1994.

Patterson J. A., US Patent 5,672,259, Sep. 30, 1997.

*Petrillo C., Sacchetti // Europhys. Lett.*, 1989, v. 10, N 1, pp. 15—18.

*Pinchuk A. O., Vysotskii V. I., Zhmudskii A. A.* The method of quick restoration of dielectric permeability spectra on the base of the analysis of their absorbtion spectra, Spectroscopy of Biological Molecules: New Directions, Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 403—404.

*Pinchuk A. O., Vysotskii V. I.* Long-range intermolecular interaction between broken DNA fragments // *Physical Rev. E*, 2001, v. 63, N 3, pp. 31904—31910.

*Pokropivny V. V., Ogorodnikov V. V.* // 工業物理学雑誌宛レター, 1990, 第16巻, 第21冊, pp. 31—34.

Pons S., Fleischmann M. // Transactions of Fusion Technology, 1994, v. 26, p. 87.

Pool R. // Science, 1990, v. 250, N 4987, pp. 1507-1508.

*Preparata G.* QED Coherence in Matter, (World Scientific Publ. Co., Singapore, New Jersy, London, Hong Kong), 1995.

Preparata G. // A.I.P. Conf. Proceedings (Prov, Utah), 1990a, v. 228, p. 840.

Preparata G. // Fusion Technology, 1990a, v. 20, p. 82.

Preparata G. // Proc. Cold Fusion Conf., Salt Lake City, Utah, 1990b, p. 91.

*Preparata G.* // Proceedings of ICCF-6, 1996, p. 136.

Preparata G. // Italian Phys. Society Conf. Proceedings, 1991b, v. 33, p. 453.

Preparata G. // Transactions of Fusion Technology, 1994, v. 26, pp. 397-407.

*Rabinowitz M., Kim Y. E., Chechin V. A., Tsarev V. A. // Transactions of Fusion Technology,* 1994, v. 26, pp. 3—12.

*Rabinowitz M. // Modern Phys. Lett. B,* 1990, v. 4, N 10, p. 665.

Rabinowitz M. // Modern Phys. Lett. B, 1990, v. 4, N 4, pp. 233-247.

*Rabinowitz M., Worledge D. H. // Fusion Technology*, 1990, v. 17, pp. 344—349.

Rafelski J., Sawicki M., Gajda M., Harley D. // Fusion Technology, 1990, v. 18, pp. 136—142.

Ragheb M., Miley G. H. // Fusion Technology, 1989, v. 16, pp. 243-247.

Rambaut M. // Transactions of Fusion Technology, 1994, v. 26, pp. 486—492.

*Rao K. R., Chaplot S. L. // Fusion Technology*, 1996, v. 30, pp. 355—362.

*Reed R. H., Powell P., Stewart W. D. P.* Uptake of potassium and rubidium ions by the cyanobacterium *Anabaena variabilis // FEMS Microbiol. Lett.,* 1981, v. 11, N 4, pp. 233—236.

*Rodriguez-Navarro A., Ramos J.* Dual system for potassium transport in *Saccharomyces cerevisiae // J. Bacteriol.,* 1984, v. 159, N 3, pp. 940—945.

*Rohde G.* Die biologische Verwitterung // *Z. ges. Hyg.* 1963, v. 9, N 2, pp. 94—99.

Romodanov V. A. et al. // Proc. ICCF-4, Lahaina, Maui, 1994, v. 3, p.22-1.

*Romodanov V. A., Savin V. I., Shakhurin M. V.* // 工業物理学雑誌, 1991, 第 61 巻, 第 5 冊, pp. 122—125.

Russell J. // Annals of Nuclear Energy, 1990, v. 17, p. 545.

*Russell J. // Annals of Nuclear Energy,* 1991a, v. 18, p. 75.

Russell J. // Annals of Nuclear Energy, 1991b, v. 18, p. 305.

*Sakaguchi T., Sakaguchi S.* Interactions between Cd and Zn uptaken into *Escherichia coli //* Kitasato Arch. Exp. Med., 1981, v. 54, N 1/2, pp. 25—34.

*Sakaguchi T., Tsuji T., Nakajima A., Horikoshi T.* Accumulation of cadmium by green microalgae // *Eur. J. Appl. Microbiol. and Biotechnol.,* 1979, v. 8, N 3, pp. 207—215.

*Sakharov A. D. //* ソ連科学アカデミー物理学研究所報告論文, 1948, 130 p.

Samsonenko N. V. et al. // Phys. Letters A, 1996, v. 220, p. 297.

*Samsonenko N. V. et al. // Phys. Letters A*, 1997, v. 229, p. 133.

*Sapogin L.G.* // Proceedings of ICCF-4, Lahaina, Maui, 1994, v. 4, p. 17-1.

Sapogin L.G. // 論集『常温核融合と新エネルギー源』, ミンスク, 1994, pp. 132-143.

*Sapogin L.G. // Infinite Energy,* 1996, v. 1, N 5/6, p. 75.

Sapogin L.G. // 論集『常温核融合』,第4回常温核融合に関するロシア会議資料, 1996,モスクワ,科学研究センターエルジオン, 1997, pp. 142—145.

*Savvatimova I. B., Karabut A. B., Kucherov Ya. R. //* Proceedings of ICCF-4, Lahaina, Maui, Hawaii, 1993, p. 16-1.

*Savvatimova I. B., Karabut A. B., Kucherov Ya. R.* 論集『常温核融合』所収, 第1回常温核融 合に関するロシア会議資料,ノヴォシビルスク, 1993, モスクワ, 1994, pp.132—147.

*Savvatimova I. B.* // Proc. ICCF-7, Vancouver, Canada, 1998, pp. 342—350.

Schwinger J. // Proceedings of Cold Fusion Conference, Salt Lake City, Utah, USA, 1990a.

*Schwinger J. // Transactions of Fusion Technology,* 1994, v. 26, pp. xiii—xxi.

Schwinger J. // Zeitschrift für Naturforschung, 1990c, v. 45a, p. 756.

Schwinger J. // Zeitschrift für Physik D, 1990b, v. 15, pp. 221—225.

*Scott J. A., Sage G. K., Palmer S. J.* Metal immobilization by microbial capsular coatings // *Biorecovery*, 1988, v. 1, N 1, pp. 51—58.

*Searle P. G. E., Hughes J. D.* Effects of microbial population and culture phosphate composition on the activity of pyrophosphatases from soil microorganisms // *Soil Biol. and Biochem.,* 1977, v. 9, N 3, pp. 157—160.

Seeliger D., Meister A. // Fusion Technology, 1991, v. 19, pp. 2114—2118.

*Segre S. E., Atzeni S., Briguglio S., Romanelli F. // Europhys. Lett.,* 1990, v. 11, N 3, pp. 201—206.

*Senesi N., Sposito G., Martin J. P.* Copper(II) and iron(III) complexation by humic acid-like polymers (melanins) from soil fungi // *Sci. total. Environ.,* 1987, v. 62, pp. 241—252.

Shaw G. L., Skin M., Bland R. W. et al. // Nuovo Cimento, 1989, v. 102 A, N 5, pp. 1441—1447.

*Shihab-Eldin A. A., Rasmussen J. O., Justice M., Stoyer M. A.* Preprint LBL-27086, University of California, California, USA, 1989.

*Shimamura I. // Progress of Theoretical Physics.* 1989, v. 82, N 2, pp. 304—314.

*Shu Zhen, Davies G. J. // Phys. Stat. Sol.* (a), 1983, v. 78, N 2, pp. 595—605.

*Silver S.* Bacterial transformations of metals and resistance to heavy metals // Changing Metal Cycles and Human Health. Rept. Dahlem Workshop (Berlin, March, 20—25, 1983). — Berlin etc., 1984, pp. 199—223.

Sobotovich E. V., Kovalyukh N. N., Zhdanova N. N. et al. チェルノブイリ原子力発電所の影響 区域内の土壌生物地質工学系中における原子炉用黒鉛の放射性炭素の移動 // 「チェルノ ブイリ-92」発表要旨集,第4回国際科学技術会議「チェルノブイリ原子力発電所の8年 間の事故処理作業に関する総括」資料,ゼリョーヌイムィス,1994, p.68.

*Soljanto P., Tuovinen O. H.* A microcalorimetric study of U(IV)-oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans* and ferric-iron // *Biogeochem. Ancient and Modern Environ.* —Berlin etc., 1980, pp. 469—475.

*Springborg M.* // *Europhys. Lett.*, 1990, v. 11, N 4, pp. 325—330.

*Srinivasan M. // Current Science,* 1991, v. 60, N 7, p. 417.

*Steinman H. M.* Bacteriocuprein superoxide dismutases in pseudomonads // *J. Bacteriol.,* 1985, v. 162, N 3, pp. 1255—1260.

*Storms E.* // Proceedings of ICCF-8, Lerici, 2000, pp. 55—61.

*Storms E. // Fusion Technology*, 1991, v. 20, pp. 433—470.

*Storms E. // J. Sci. Expl.*, 1996, v. 10, pp. 185—216.

Sun Z., Tománek D. // Phys. Rev. Lett., 1989, v. 63, pp. 59—61.

Sutherland G. B. B. M., Tsuboi M. // Proc. Roy. Soc. A, 1957, v. 239, p. 446.

*Swartz M. R. // Fusion Technology*, 1997, v. 31, pp. 228—236.

*Syroeshkin A. V., Matveeva I. S., Pleteneva T. V. et al.* 種と生理学的状態のベクトル特性としての金属の元素プロファイル // 医学における微量元素, 2002, 第4巻, 第3冊, pp. 15—21.

*Tabet E., Tenenbaum A. // Phys. Lett. A*, 1990, v. 144, N 6-7, pp. 301-305.

*Tabet E., Tenenbaum A. // Fusion Technology,* 1990, v. 18, pp. 143—146.

*Takahashi A. // Fusion Technology*, 1991, v. 19, p. 380.

*Takahashi A.* // Proceedings of ICCF-7, Vancouver, Canada, 1998, pp. 378—382.

*Takahashi A. // J. of Nuclear Science and Technology*, 1989, v. 26, N 5, pp. 558—560.

*Takahashi A., Mega A., Takeuchi T. et al.* // Proceedings of ICCF-3, Nagoya, Japan, 1992, "Frontiers of Cold Fusion", (H. Ikegami, ed.), p. 79.

*Takeda T., Takizuka T. // J. Phys. Soc. Jpn,* 1989, v. 58, p. 3073.

*Tashirev A. B.* 微生物と金属の相互作用の理論的側面.金属の還元変換 // 微生物学雑誌, 1994, 56, N 6, pp. 76—89.

Tashirev A. B. 微生物と金属の相互作用の理論的側面.金属の多量元素との立体化学的類 似性に起因する微生物による金属蓄積 // 微生物学雑誌, 1994, 56, N 6, pp. 89—100.

Tashirev A. B. 微生物と金属の相互作用 // 微生物学雑誌, 1995, 57, N 2, pp. 95-104.

*Taubes G.* Bad Science: the short life and weird times of cold fusion. (Random House) 1993.

*Taylor B. F., Oremland R. S.* Depletion of adenosine triphosphate in *Desulfovibrio* by oxyanions of group VI elements // *Curr. Microbiol.,* 1979, v. 3, N 2, pp. 101—103.

*Tezuka T., Tonomura K.* Purification and properties of an enzyme catalyzing the splitting of carbon-mercury linkages from mercury-resistant *Pseudomonas* K-62 strain. I. Splitting enzyme 1 // *J. Biochem.,* 1976, v. 80, N 1, pp. 79—87.

Tisenko Yu. A. // 高等教育機関紀要. 物理学. 1993, N 8, pp. 66—76.

*Tsarev V.A.* // 物理科学の成果, 1990, 第 160 巻, 第 11 号, pp. 1—53.

Tsarev V.A. // 物理科学の成果, 1991, 第161巻, 第4号, pp. 152—177.

*Tsarev V.A.* // 物理科学の成果, 1992, 第162巻, 第10号, pp. 63—91.

*Tsarev V. A., Worledge D. H. // Fusion Technology,* 1991, v. 20, N 4, pp. 484—508.

*Tsuchiya K., Ohashi K., Fukuchi M. // Transactions of Fusion Technology,* 1994, v. 26, p. 493.

*Turner L. et al. // Physics Today,* 1989, v. 42, N 9, p. 140.

*Vaidya S. N. // Fusion Technology,* 1991, v. 20, N 4, pp. 481—483.

*Van Brunt J., Caldwell J. H., Harold F. M.* Circulation of potassium across the plasma membrane of *Blastocladiella emersonii* : K<sup>+</sup> channel // *J. Bacteriol.,* 1982, v. 150, N 3, pp.

1449—1461.

Van Siclen C. DeW., Jones S. E. // J. Phys. G: Nucl. Phys, 1986, v. 12, N 3, pp. 213—221.

*Vaselli M., Harith M. A., Palleschi V. et al. // Nuovo Cimento,* 1989, v. 11 D, N 6, pp. 927-932. *Vavilova N. M.* 薬力学, 第1部, ロストフナドヌ, 1992.

*Vernadsky V.I.* 地球の生物圏と環境の化学構造,モスクワ, Nauka, 1987, 339 p.

*Vinogradov A. P.* 生物地球化学研究所論集,科学アカデミー出版所,モスクワ・レニング ラード, 1935 (Vinogradov A. P. Travaux du laboratoire biogéochimique de l'Académie des sciences de L'URSS, 1935).

*Violante V., De Ninno A. // Fusion Technology*, 1997, v. 31, pp. 219—227.

*Vysotskii V. I., Kuzmin R. N.* // 工業物理学雑誌宛レター, 第7巻, 第16冊, 1981, pp. 981—985.

*Vysotskii V. I., Kuzmin R. N. // ガンマレーザー*, モスクワ国立大学出版部, 1989.

*Vysotskii V. I., Kuzmin R. N.* Theory, mechanisms and dynamics of nonbarrier nuclear catalysis in solids // Preprint of Institute of theoretical Physics ITP-90-82P, Kiev, 1990.

*Vysotskii V. I., Kuzmin R. N.* 量子障壁メカニズムと微小累積メカニズムにもとづく結晶中における常温核融合の温度-時間ダイナミクス // 『常温核融合』所収,中央機械製造研究所出版部, 1992, pp. 6—13.

*Vysotskii V. I., Kuzmin R. N.* 微小粒子群の場合における非一様フェルミ凝縮現象にもとづ く常温核融合時における無障壁相互作用および最適形状・最適寸法の微小空孔中における 2 個重陽子のパルス局在化のメカニズム // Intern. Symposium "Cold fusion and advanced energy sources". Minsk, 1994 (a), pp. 288—295.

*Vysotskii V. I., Kuzmin R. N.* 沸騰および電気分解時における D<sub>2</sub>O バルク中における DD 常 温核融合の実現条件 // 『常温核融合に関するロシア会議資料 1』, アブラウ・デュルソ, 9~10 月, 1994 (b), VENT 出版社, モスクワ, pp. 58—60.

Vysotskii V. I., Kuzmin R. N. // 工業物理学雑誌, 1994, 第64卷, 第7冊, pp. 56—63.

*Vysotskii V. I., Pinchuk A. O.* Analysis of long-range interaction of end-pairs of nucleotides in the region of DNA's double-strand breaks // Spectroscopy of Biological Molecules: New Directions, Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 405—406.

*Vysotskii V. I., Pinchuk A. O., Kornilova A. A., Samoylenko I. I.* Modeling and time-dependent dynamics of processes of stimulated depolymerization, auto-repairing, degradation and radiation curing of DNA macromolecules and biopolymers at separated and combined actions of ionizing irradiation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2001, v. 185, pp. 108—115.

*Vysotskii V. I., Pinchuk A. O., Kornilova A. A., Samoylenko I. I.* The time-dependent dyamics and modeling of processes of depolymerization and autorepairing of DNA macromolecules at separated and combined actions of ionizing irradiation // Spectroscopy of Biological Molecules: New Directions, Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 401—402.

*Vysotskii V. I.* Conditions and mechanism of nonbarrier double-particle fusion on potential pit in crystal // Proceedings: Fourth Intern. Conference on Cold Fusion (Lahaine, Hawaii, December 1993), 1994, v. 4, pp. 20.2—20.5.

*Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I.* 微生物培養物中における常温元素変換タイプの核変換による安定同位体の製造方法.特許(ロシア)1995年1月18日付第205223号.

*Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I.* Effect of viscosity propehrties of intermolecular and intercellular medium on the stability of DNA against radiation // Intern. symposium of ionising radiation "Protection of the natural environment", May 1996, Stockholm, Proceedings, v. 2, pp. 478—482.

*Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I.* メスバウアー効果を用いた生物培養物中に おける同位体の低エネルギー核変換現象の検出とその研究 // 新医療技術通報, v. 3, N 1, 1996, pp. 28—32.

*Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I.* Experimental discovery of phenomenon of low-energy nuclear transmutation of isotopes ( $Mn^{55} \rightarrow Fe^{57}$ ) in growing biological cultures // Proceedings of Sixth Intern. Conf. on Cold Fusion, v. 2, 1996, pp. 687—693.

*Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I.* Experimental observation and study of controlled transmutation of intermediate mass isotopes in growing biological cultures // Proceedings of the 8th International Conference on Cold Fusion (edited by F. Scaramuzzi), Lerici (La Spezia), Italy, 21—26 May, 2000, pp. 135—140.

*Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I.* Observation and mass-spectroscopy study of controlled transmutation of intermediate mass isotopes in growing biological cultures // *Infinite Energy*, March/April 2001, v. 6, N 36, pp. 64—68.

*Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I.* The molecular mechanisms of autorepairing of double damages of DNA // *Radiation Biology. Radioecology,* 1997, v. 37, pp. 494—507 (In Russian).

*Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I.* The problem of radiation damage to DNA. What kinds of double radiation breaks in DNAs are irreversible (quantum-mechanical and electrodynamic approaches)? // Intern. symposium of ionising radiation "Protection of the natural environment", May 1996, Stockholm, Proceedings, v. 2, pp. 489—494.

*Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I.* The problem of radiation damage to DNA. Methods for control of antagonism and radioprotective effect in combined action of hard and soft ionising radiation on DNA. // Intern. symposium of ionising radiation "Protection of the natural environment", May 1996, Stockholm, Proceedings, v. 2, pp. 483—488.

*Vysotskii V. I., Kornilova A. A., Samoylenko I. I.* Experimental discovery and investigation of the phenomenon of nuclear transmutation of isotopes in growing biological cultures // *Infinite Energy*, v. 2, N 10, 1996, pp. 63—66.

*Vysotskii V. I., Kuzmin R. N.* On possibility of non-barrier dd-fusion in volume of boiling D<sub>2</sub>O during electrolysis // Proceedings: Fourth Intern. Conference on Cold Fusion (Lahaina, Hawaii, December 1993), 1994, v. 4, pp. 6.1—6.3.

*Vysotskii V. I., Kuzmin R. N.* The theory of nonthreshold cold fusion in solids // Int. Progress Review "Anomalous nuclear effects in deuterium/solid systems". Edited by S. E. Jones, F. Scaramuzzi, A.I.P. Conf. Proceed., 1991, v. 228, pp. 894—910, N.Y.

*Vysotskii V. I., Pinchuk A. O.* Peculiarities of long-range interaction between the nucleotides after DNA damage // *Bioelectrochemistry and bioenergetics,* 1999, v. 48, N 2, pp. 329—331.

*Vysotskii V. I., Pinchuk A. O., Kornilova A. A., Samoylenko I. I.* The dynamics of radiationstimulated hormesis and processes of DNA self-reparation at the combined action of ionizing irradiation on biological systems // *Nuclear and Radiation Safety,* 1999, v. 2, N 2, pp. 66—80 (In Russian).

*Vysotskii V. I., Vorontsov V. I. //* 実験・理論物理学雑誌, v. 66, N. 5, 1974, pp. 1528—1536.

*Waber J. T.* // In *Cold Nuclear Fusion,* Proceedings of 4 Russian Conf. on Cold Fusion and Nuclear Transmutation, Sochi, 1996, Moscow, 1997, pp. 192—220.

Waber J. T., Cromer D. T. // Journ. Chem. Phys., 1965, v. 42, N 12, pp. 4116-4123.

*Wakatsuki T., Imahara H., Kitamura T., Tanaka H.* On the absorbtion of copper into yeast cells *// Agr. and Biol. Chem.,* 1979, v. 43, N 8, pp. 1687—1692.

*Weege K.-H., Thriene B.* Mechanismen und Bedeutung der bakteriallen Schwermetallresistenz // Mengen- und Spurenelem.: Arbeitstag. Agrawiss. und Chem. Ges. (Jena, 19— 20 Dez., 1989). —Leipzig, 1989, pp. 94—101.

*Weiss A., Schotell J., Silver S.* Plasmid-determined heavy metall resistance in *Staphylococcus aureus* // Abstracts of Annual Meet. Amer. Soc. Microbiol. (Atlantic City, N.Y., 1976). — Washington D.C., 1976, p. 101.

*Wilkens S., Gorisch H.* Austausch von Calcium durch Cadmium, Strontium oder Mangan bei der Quinoproteinglucosedehydrogenase // *Forum Microbiol.*, 1989, v. 12, N 1/2, p. 82.

*Wood J. M., Wang H. K.* Microbial resistance to heavy metals. Some microorganisms have developed "strategies" for combating effects of toxic inorganics, and several may prove useful for their removal from wastewater *// Environ. Sci. Technol.*, 1983, v. 17, N 12, pp.582A—590A.

*Yang J., Chen D., Zhou G. et al. // Fusion Technology,* 1994, v. 25, pp. 203—206.

*Yang J. // Acta Scientiarum Naturalium,* 1991, v. 14, p. 126.

*Yaroslavskii M. A. //* 第10回固体のメカノエミッションとメカノケミストリーに関する全 連邦記念シンポジウムにおける報告,ロストフナドヌ,1986.

*Yaroslavskii M.A.* // ソ連科学アカデミー報告論文集, 1989, 第 307 巻, 第 2 号, pp. 393—370.

*Yaroslavskii M.A.*// ソ連科学アカデミー報告論文集, 1989, 第 307 巻, 第 3 号, pp. 600—601.

*Yaroslavskii M.A.* // ソ連科学アカデミー報告論文集, 1990, 第 308 巻, 第 1 号, pp. 95—97.

*Yasui K. // Fusion Technology*, 1992, v. 22, pp. 400—406.

*Zakowicz W. // Fusion Technology,* 1991, v. 19, pp. 170—173.

Zelenskii V. F., Rybalko V. F. // 原子科学と技術の諸問題, 1991, 第2巻, p.46.

Zel'dovich Ya. V., Gershtein S. S. // 物理科学の成果, 1960, 第 71 巻, 第 4 冊, pp. 581—630.

## [訳注] 著者紹介



ウラジーミル・イワノヴィッチ・ヴィソツキー

(Владимир Иванович Высоцкий, Vladimir Ivanovich Vysotskii) ウクライナの物理学者。1946年生。数理物理学博士,教授,キ エフ大学電波物理学部数学・理論電波物理学科学科長。

ウラジーミル・イワノヴィッチ・ヴィソツキーは 1969 年にキ エフ大学電波物理学科(専攻:量子電波物理学)を優等で卒業 し,兵役に服した後,同大学大学院で学んだ。1975年,論文「強 制メスバウアー放射の理論」により準博士号を取得,1992年, 論文「放射および粒子と結晶の間における無閾値・コヒーレン

ト相互作用のモデルと理論」により博士号を取得。

1974~93 年,同大学研究員,助教授。1993 年より数学・理論電波物理学科教授, 2006 年より同学科の学科長を務めている。

### V.I. ヴィソツキーの主要研究領域と研究業績

- ・高エネルギー・高周波レーザー物理学のモデルとシステムに関する研究
- ・核物理学および原子物理学におけるコヒーレントな過程と現象の特徴に関する研究
- ・荷電粒子のコヒーレント相関状態により荷電粒子が相互作用するときのクーロンポ テンシャル障壁の作用の弱化・抑制現象にもとづく物理系および生物系における低 エネルギー時の核過程の実現メカニズムに関する研究
- ・異常条件および臨界条件下における核過程に関する研究
- ・生物物理学および電波生物学の基本問題の物理学的側面に関する研究
- ・水の空間構造に関する研究ならびに外部の物理的要因の作用に起因する水の物理学 的特性の変化に関する情報の長時間保存に関する問題(事実上,水の一種の「記憶」 に関する問題)に関する研究
- 1. Высоцкий В.И., Кузьмин Р.Н. Гамма-лазеры, Москва, Изд. МГУ, 1989, 176 с.
- 2. Высоцкий В.И. Корнилова А.А. Ядерный синтез и трансмутация изотопов в биологических системах. Москва, Мир, 2003, 302 с.
- 3. Vysotskii V.I., Smirnov I.V., Kornilova A.A. Introduction to the Biophysics of Activated Water, Universal Publishiers, USA, 2005, 160 p.
- 4. Adamenko S.V., Vysotskii V.I. Stability of Electron-Nucleus form of matter and methods of controlled collapse. In the book Controlled Nucleosynthesis. Breakthroughs in Experiment and Theory. Editors S.V.Adamenko, F.Selleri, A.van der Merwe), Series: Fundamental theories in Physics, v.156, Springer, 2007, Chapter.11, pp. 415-541.
- 5. Висоцький В.І. Квантова механіка та її застосування в прикладній фізиці. Підручник, видавництво Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, 2008, 358 с. Рекомендовано Министерством образования и науки, молодежи и спорта Украины.
- 6. Vysotskii V.I., Kornilova A.A. Nuclear transmutation of stable and radioactive isotopes in biological systems, Pentagon Press, India, 2009, 187 p.
- 7. Vysotskii V.I., Kornilova A.A., Smirnov I.V. Applied biophysics of activated water (the physical properties, biological effects and medical applications of MRET activated water), World Scientific Publishing, Singapore, 2009, 317 p.

- Висоцький В.І., Дяченко С.А., Карлаш Г.Ю., Овечко В.С., Прокопенко О.В., Харченко Н.П. Атомна та ядерна фізика в прикладах і запитаннях. Учбовий посібник. Видавництво Київського національного університету імені Тараса Шевченка, (за ред. В. І. Висоцького, В. С. Овечка). Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2011. — 511 с. екомендовано Министерством образования и науки, молодежи и спорта Украины.
- Vysotskii V.I., Kornilova A.A. Controlled spontaneous decay of Mossbauer nuclei (theory and experiments). In the book MOSSBAUER SPECTROSCOPY: APPLICATIONS IN CHEMISTRY, BIOLOGY, AND NANOTECHNOLOGY, Editors: Virender K. Sharma, Gostar Klingelhofer, and Tetsuaki Nishida, John Wiley and Sons, Inc., 2013, 450 p., Chapter.11, p. 292-315.
- 10. В.И. Высоцкий, В.И. Воронцов, Р.Н. Кузьмин, П. А. Безирганян, А. Г. Ростомян. «Опыт Саньяка на рентгеновском излучении» // УФН, 164:3 (1994), 309–324
- 11. В.И. Высоцкий, Р.Н. Кузьмин «Каналирование нейтральных частиц и квантов в кристаллах» // УФН, 162 (9) 1-48 (1992)
- А. А. Опаленко, В. И. Высоцкий, А. А. Корнилова "О феномене осциллирующего распада изомера 125Te" // Письма в ЖЭТФ, 79:5 (2004), 254–256
- 13.В.И. Высоцкий, Р.Н. Кузьмин, Н.П. Савенкова "Численный анализ ориентированного движения нейтральных частиц в кристаллах" // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 28:6 (1988), 954–955



\* \* \* \* \* \* \* \* \* \* \* \* \* \* \* \* \* \* \*

アーラ(アリビナ)・アレクサンドロヴナ・コルニロワ (Алла (Альбина) Александровна Корнилова, Alla (Albina) Aleksandrovna Kornilova)

ロシアの物理学者。1946年生。数理物理学準博士,モスクワ 国立大学固体物理学科上級研究員,モスクワ国立大学物理学 部イノベーションセンター所長。生物系における化学元素変 換の存在を実験的に証明した(1993年)。

アーラ (アリビナ)・アレクサンドロヴナ・コルニロワはモ スクワ国立大学物理学部を卒業後、同大学大学院で学び、

1999年,論文「外部からの物理的作用下における単結晶中におけるメスバウアー効果 に関する研究」により数理物理学準博士号を取得。同大学固体物理学科研究員として 主に固体核物理学に関する研究に取り組んでいる。

A.A.コルニロワの主要研究領域と研究業績については付録「21世紀の錬金術師たち」 を参照されたい。

## [付録] 21 世紀の錬金術師たち

[これはロシアの出版社 OVIZO の広告情報局 PRo Atom のサイトに掲載されている記 事(<u>http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=8528</u>)の全訳 である。]

# 21 世紀の錬金術師たち

### アレクサンドル・プロスヴィルノフ(Aleksandr Prosvirnov) 2019年4月9日

2018年にテレビ局「チャンネル1」で放送されたシリーズ「錬金術師」は、現代の 錬金術師たちの途方もない夢想を描いていた。しかし、20世紀末~21世紀初頭の実験 家たちの成功は、中世以来のいくつかの夢想が現代の条件下で既に実現されつつある ことを示している。そのような結果として挙げることができるのは、モスクワ国立大 学のアーラ・アレクサンドロヴナ・コルニロワの研究である。その実験的研究の結果 は有名な査読付き雑誌やモノグラフにおいて発表され、国際会議において報告された [1]。

コルニロワによって研究された諸過程は暫定的に次のように分類することができる。

・生物学的媒質中における元素変換 [2~7]

・細い誘電体流路を通る液体流の高速運動時における指向性を持つ強い硬準レーザー放射線 [intensive directed hard quasi-laser radiation]の発生 [8~12]

- ・液体流のキャビテーション時における異常な放射・熱現象 [8~12]
- ・キャビテーション時に形成される非減衰性熱波 [8~12]
- ・熱波場中に存在する重水素化チタンによるアルファ粒子の安定的発生[13]

・アルファ粒子(He4)の検出を伴うヒドロホウ酸塩中における反応 B11+H1→

3He4+8.7 MeV の開始 [14~15]

生物学的媒質中における元素変換はフランス人ルイ・ケルヴランによって初めて研究された[2]。彼はその実験において、生物学的対象物を特定の元素から隔離し、メンデレーエフの周期表上の隣接元素からその元素が変換により形成されることを見出した。コルニロワはメスバウアー効果を用いた材料の核物理学的研究を専門としていた。それゆえ、彼女が1992年から Mn55 と D2 から得られる Fe57 (同位体 Fe57 は戦略的重要性を持つ材料である)の核融合に関する一連の研究を行ったことは、まったく論理的なことであった。それに続いて、さらに放射性同位体 Cs137 の Ba137 への変換に関する実験が行われた。

1995年1月,「微生物培養物中における元素の常温核融合タイプの核変換による安定同位体の製造方法」に対する1995年1月18日付ロシア連邦特許第20522223号が得られた。これらの研究はロシア科学アカデミー疑似科学・科学研究捏造対策委員会 [歌注]の仕事の対象には入らなかった。メスバウアー効果を用いた同位体 Fe57の検出 技法が、あまりにも強い説得力を持っていたからである。

微生物培養物中における同位体変換に関するコルニロワの研究作業はその後も引き 続き行われた。最も輝かしい業績は,原子力発電所の放射性廃棄物のリサイクルの際

<sup>&</sup>lt;sup>[歌注]</sup> 疑似科学・科学研究捏造対策委員会は V.L.ギンズブルグの首唱により「正統派」科学の擁護を目 的として 1998 年に創設されたロシア科学アカデミー幹部会附置研究調整機関。同委員会による異端審 問の対象には相対性理論に対する批判等が含まれている。本書第1章「まえがき」の厳しい文言から, 同委員会に対する V.I.ヴィソツキーと A.A.コルニロワの批判的な姿勢をうかがい知ることができる。

に問題となる同位体の1つである Cs137のリサイクルに関する研究である。

1997~1998 年, Cs137 と Sr90 のリサイクルに関する研究がチェルノブイリの企業「ウクルィチエ」において行われた。行われた研究によって次の結果が得られた。同位体 Cs137 の半減期は 30 年, Sr90 の半減期は 29 年であるが,それらの実験溶液は 250~270 日間で非放射化された。

2003年,モノグラフ『生物系における核融合と同位体変換』[5]が Mir 出版社から 出版された。この年,原子力省宛てに書簡が提出され,原子力部門の研究所において 何回かの報告が行われた。それらの報告に対する反応はなかった。

日本の福島における事象の後,海水中の放射性廃棄物のリサイクルに関する研究作 業が行われた。この技術の効果が裏づけられ,国際特許「水中からの放射性核種の除 去方法」が得られた。2016年,全ロシア無機材料研究所において Cs137のリサイク ルに関する鑑定が行われ,肯定的な結果が得られた。放射性同位体 Cs137の14%が14 日間で非放射化された。ロシア連邦原子力庁の会議におけるコルニロワの報告につい ては文献[6]に書かれている。2019年2月,韓国の研究者たちの論文[7]が発表さ れた。その著者らは,放射性同位体 Cs137の非放射性元素 Ba138への生物変換に関す るコルニロワの方法の有効性を裏づけた。この研究は科学技術省から資金を供与され ている韓国研究財団(NRF)によって支援されていたことに注目する必要がある。言 い換えると,ロシアにおいては低エネルギー核反応領域の研究は依然として疑似科学 に分類され,その研究者たちは侮辱や迫害を受け,解雇さえされているのに対し,韓 国政府はこの領域の研究に対して公的に資金を供与しているのだ。

コルニロワは生物変換の研究と並行して、余剰熱の取得に関する綿密な研究を進めていた。彼女はある会議でA.I.コルダマソフ [Aleksandr Ivanovich Koldamasov] と知り合いになった。彼は自分が開発した装置(図1参照)の話をした。コルニロワはコルダマソフの装置を改良し、様々な媒質(水、各種の油)を試し、最適なパラメーターを見出してユニークな結果を得た [8~12]。



図 1. 液体流の形成過程とそれに続くキャビテーションに対する衝撃波の正のフィードバック(特殊な形をした矢印)を考慮に入れた液体流のキャビテーション時における X線放射の形成スキーム [11]

研究の過程で、ワーキングチャンバーの表面が X 線放射を惹起していることが発見 された。それだけでなく、特殊な音響検出器を用いて未知の本性を持つ放射が記録さ れた。その放射は「熱波」と名づけられた。

論文[11]の要約において,著者らは次のように書いている。「循環している油のバルク中におけるキャビテーションバブルの生成と発達がその内部において進行しているチャンバーの本体ならびに流路の入口部分および水流の最初の区間が強いX線放射

の発生源であり、そのX線放射の発生はキャビテーション過程およびそれに続く衝撃 波の励起と関係していることが発見された。X線放射の周波数(エネルギー)は放射 表面上の原子(油の場合はチャンバー本体の原子、水流の場合は水流表面の原子、流 路の場合は表面上の金属原子)に依存しており、原子の電荷が増大するにつれて1keV から5keVまで増加する。研究されるこの装置内におけるX線放射の全エネルギーは、 水流が自由流出モードのとき0.1 Ciである。水流のキャビテーションの結果空気中で 形成される音響衝撃波が離れた所に置かれた厚いスクリーンに及ぼす作用が、それら のスクリーンの反対側において指向性を持つ準コヒーレントなX線放射の発生をもた らすことが初めて発見された。このX線放射の空間的パラメーターはスクリーンの形 状と断面積、また衝撃波の空間的特性に依存している。組み合わされた音響波-X線 波を最終集束するために「古典的」な固体レンズ(ガラスレンズと金属レンズ)を利 用することが可能であると予想し、その利用に関する実験を行った。そのような装置 はパルスX線放射の集束に利用できることが示された。この放射メカニズムは音ルミ ネセンスに属するものではなく、キャビテーションに伴う新たな種類の発光である」。

さらに,論文[11]の著者らは次のように指摘している。「X線放射の発生効果は, 2つの条件,すなわち,a)キャビテーションバブルが液体流のバルク中において形成 されている,b)キャビテートする液体の空間的に発散する流れがチャンバーの壁の内 側表面と接触しているという条件が同時に満たされ,圧力が比較的小さいときにのみ 観測された。このとき,衝撃波のエネルギーはキャビテーションの中心から液体を通 ってチャンバーの外側表面へ伝わり,そこでX線放射が発生する」。

論文 [12] では、キャビテーション時に圧壊するバブルから出る衝撃波が、いわゆる「熱波」を生じさせるという結論が下されている。彼らはこの結論を熱波の伝播距離が大きいという事実によって根拠づけ、それと同時に次のように書いている。「周波数  $\omega$ HF = ~10…100 MHz の 極 超 音 波 の 室 温 で の 空 気 中 に お け る 伝 播 は  $\delta(T)$ ~10<sup>2</sup>…10<sup>4</sup> cm<sup>-1</sup>というきわめて大きい減衰係数に相当する。この減衰係数は~100 µmから1 µmまでの区間の極超音波の行程に相当する。この行程の大きさは我々が行なった実験の結果の10<sup>4</sup>…10<sup>6</sup>分の1 である。我々の実験では、そのような音波は1m以上離れた所で記録された」。この波が熱的な本性を持つという結論は時期尚早かもしれないが、著者らは未知の物理現象を発見したと言うことはできる。この現象は注意深い研究とその本質の理解を要求している。

これらの研究の実施の過程で制御可能な周波数と出力を持つ新たなX線放射装置の プロトタイプが得られ,X線光学に関するあらゆる実験が行われた。大気中における ユニークな MHz 放射が得られた。この放射は、これまで本性が知られていなかった非 減衰性温度波の創出を用いた遠距離間の情報伝達に利用することができる。これは新 たなブレークスルー技術である。

油が細い流路を通過するときのキャビテーション過程に関する研究作業はバウマン 記念モスクワ国立工科大学においても行われたことを指摘する必要がある。その研究 結果は論文[18]に示されている。

コルニロワは重水素化金属に対する「熱波」の作用の検証に取り掛かった。その結 果は予想外のものであった。試料がアルファ粒子を放射し始めたのである。この実験 は論文[13]に書かれている。「熱波の作用対象としては粒径50 µm以下の多結晶重水 素化チタンが選ばれた。それらの試料は長さ約1cm,直径約7mmの円柱の形状を持 っていた。刺激を与える高周波熱波はその試料に対して円柱軸の方向に,すなわち円 柱の端面に垂直な方向に入射した。アルファ粒子のトラッキング解析には密度1.3 g/ cm<sup>3</sup>の CR-39 タイプのポリカーボネート(ポリアリルジグリコール)製のプラスチッ ク製検出器が利用された。«TASTRAK®»ブランド(Track Analysis Systems Ltd, イギリ ス,ブリストル)の検出器のシートの厚さは1mmであった。実験の典型的な設定方 法は、ターゲットの表面から5mmの距離の所に検出器を配置し、ターゲットに対し



図2. 熱波の作用を40分間受けた試料中におけるアルファ粒子の空間的分布と 運動方向の顕微鏡トラッキング解析。図2Aはトラッキング検出器が重水素化 試料の端面近傍に配置されている場合,図2Bは側面(円柱面)近傍に配置さ れている場合である。図2Cは3種類の放射性核種(ウラン233,プルトニウ ム239およびプルトニウム238)の組み合わせをベースとしたアルファ粒子放 射装置を用いたコントロール測定の結果である。

て一定時間(例えば20分間と40分間)熱波を作用させるというものであった。

測定結果を図2に示す。試料中において、アルファ粒子はいったいどこから形成されることが可能なのであろうか? 論文[13]の著者らは、それは次の反応の結果であると推定している。

d + d = p + t + 4.03 MeV

d + d = n + He3 + 3.27 MeV (以上2つの反応の断面積は0.09 bである。)

d+d=He4+23.8 MeV (この反応の断面積は10~26 bである。)

2008年, モスクワ国立大学の2人の教授も参加して反応 B11+H1→3He4+8.7 MeV におけるアルファ粒子の検出作業が行われた。その結果は文献 [14~15] に示されている。

この反応に関する着想は、A.B.チュバイス [Anatoly Borisovich Chubais, ロシアの政治家・起 業家]が取締役会の一員となっているアメリカの «Tri Alpha Energy»社によって発展さ せられつつある。同社では約 150 人の専門家が核融合炉を使って熱核融合に関する研 究を行っている。彼らは、国立研究機関には太刀打ちできないスピードで核融合炉の 改良を進めている。「TAE 社の核融合炉の基礎に横たわっている着想はプラズマ渦(こ れは FRC(Field-reserved Configuration [逆転磁場配位型])と名づけられている)の利用 である。プラズマ渦は自己保持という性質、またさらにいくつかの長所を持っており、 中性粒子ビームインジェクターを用いてその安定性を維持することができる。(略)こ れは熱核反応の最も達成困難なバリエーションの 1 つである。この反応は「古典的」 な二重水素一三重水素反応より 15 倍高い温度を要求する。すなわち、プラズマを保持 するめに磁場の圧力が 15 倍大きくなければならず、またプラズマの純度に関するよ り厳しい要件が求められる」[16]。 TAE 社は、反応 B11+H1→3He4+8.7 MeV がクーロン障壁の克服のためのエネルギー消費量を上回る出力エネルギーを伴って進行していることを立証した。これ以前には、すべての研究者はそれとは逆のことを語っている 1930 年代のデータを利用していた。これによってこの反応はさらに魅力的なものとなった。なぜなら、それは、トカマク炉の第一壁に関するより大きな問題を創出する、中性子放射が存在しないということだからである。

TAE 社の創業者である物理学者ノーマン・ロストーカー [Norman Rostoker] の意見に よれば,強力な接線方向中性粒子ビームを用いれば,FRC 渦は崩壊することなく自己 保持する能力を持っている。このことは 2015 年に立証された。その後,新たな装置 が建造された。この装置においては,プラズマの3つの要素からなるパラメーター(密 度,温度および保持時間の積)の30倍の増大が達成されるはずである [16]。今のと ころ,その成功について語ることを可能とする結果は得られていない。

コルニロワは、ヒドロホウ酸塩の結晶が持つ、加熱・冷却時に結晶格子が相転移す る際、水素を放出・吸収するという性質を利用することを提唱し、次のように述べて いる。

「ヒドロホウ酸塩への興味は、その構造中に多数の水素結合と水分子が存在するこ とに関係している。その結晶の加熱の過程において水素結合が切断され、分解の過程 で水分子と大量の陽子が解放される。天然ホウ酸塩において、そのような過程が室温 から結晶の完全破壊温度までの範囲内で観測された。実際、金属が自由電子の供与体 になることができるのと同様に、ヒドロホウ酸塩は自由酸素の供与体になることがで

きるのである。ヒドロホウ酸塩中における陽子濃度の典型値はほぼ $n_{
m p} \approx 10^{22} \, {
m cm^{-3}}$ で

ある。ヒドロホウ酸塩が大きな興味を引くもう1つの理由は、その組成が、ヘリウム 原子核3個の形成を伴う融合反応を得ることに関する仮説と理想的に一致しているこ とに関係している。ヒドロホウ酸塩が持つさらにもう1つの疑いようのない長所は、 それが安定的で、しかも地殻中に大量に含まれていることである。その結晶は、地球 が放出する自然熱エネルギーの主要な供給源の1つとなっている可能性がある[16]。

ヒドロホウ酸塩の結晶を100℃~120℃まで加熱すると,吸収された水の放出と結晶 中の孔隙の充填が生じる。脱水過程の結果,構造の変化が生じる。すなわち,その結 果,水和度がより小さい構造が形成され,結晶化した水が失われる。これらの過程に おいて,格子中において大量の準自由水素が形成される(強い陽子伝導が出現する)。

各種の鉱物(コールマナイト,インデルボライト,ウレキサイト)が研究された。 相転移温度はコールマナイトが 0℃,インデルボライトが 40℃と 100℃,ウレキサイトが 40℃と 80℃である。

試験においては、ヒドロホウ酸塩試料は 100℃を超える温度まで加熱した。測定装置は約 5.2 MeV の最大エネルギーを持つ同位体 Pu239 のアルファ粒子線源を用いて校正した。

ヒドロホウ酸塩単結晶はアルファ粒子検出器上に直接置いた。加熱は、はんだごて を用いて局所的に行った。雑音を除去するため、最初にはんだごてを加熱した後、そ のスイッチを切った。試料の加熱時には、軽いひび割れ音が聞こえた。試料の加熱器 と接触している箇所は不透明になり、乳白色を帯びた。これらの現象は、有勾配加熱 の過程で結晶中に内部応力が発生し、それに続いて試料にクラックが生じるという理 由によって説明される。

各試料ごとに数回の試験を行った。個別の各測定ごとに新たな結晶を利用した」。

ウレキサイト結晶の場合には、10 秒間、約 60.6 keV のエネルギーを持つアルファ 粒子が記録された。論文 [15] の著者らは次のように結論している。「加熱の初期段階 に観測された粒子放出は、加熱によって引き起こされた相転移時に核変換が生じてい ることを物語っている」。 インデルボライト結晶の場合には、加熱開始後の最初の 10 秒間, エネルギー29.5 keV のアルファ粒子が検出された。

コルニロワとその研究チームは「熱波」がヒドロホウ酸塩に及ぼす作用についても 研究を行った。その結果は2018年6月にコロラド(アメリカ)で開催された第21回 凝集系核科学国際会議 [ICCF-21] で報告された [14]。

凝集系における研究を行うためには,次の2つの閾条件が満たされる必要がある: a)水素同位体による固体物質の結晶格子に対する高い負荷レベル,b)それらの固体 物質のバルク中における最適な非定常的構造要素の存在。これらの条件が低エネルギ 一核反応(LENR)の確率を著しく増大させる[14]。

このような要件は複雑で長期にわたる,膨大な費用のかかる技術的操作の実施の必要性をもたらす。しかし、ヒドロホウ酸塩は必要とされる諸要素を既にその構造中に 備えている。

論文 [14] の著者らは次のように書いている。「我々の研究方法は他の研究方法とは 原理的に異なっており,事前における特殊な技術的操作を必要としない。我々の実験 において,我々は特殊な二次音響結晶内衝撃波の形の特殊な非減衰性熱衝撃波を用い ている。我々は,成功裡に行われた多数の実験において,非減衰性熱波を離れた所で 検出し,その分析を行った [8~13]。非減衰性熱波の作用が結晶格子の非定常的・潜 在的な結晶内欠陥中に存在(局在)する陽子のコヒーレントな相関状態の形成をもた らし,結晶格子は非減衰性熱波の作用の下で変形する。これらの状態においては,普 通の常温(室温)の鉱物中における陽子のエネルギーのゆらぎは30…50 keV以上に達 する可能性がある」。

離れた所に置かれた外部の非減衰性熱波源を用いたテスト実験の過程では、最大エ ネルギーE ≈ 2.9 MeVの多数の高速アルファ粒子が記録された。

上に列挙した研究テーマの他に, A.A.コルニロワはロシア連邦国防省からの発注に 従ってヒアルロン酸剤と創傷治療用包帯の開発に携わっていた。その包帯はチェチェ ン戦争の時に負傷兵が四肢切断に至ることを防ぎ,彼らの命を救った。それ以外にも 多数の業績があるが,それらに関する情報を一般メディアにおいて流布することはで きない。

### 結論

A.A. コルニロワによる実験的研究の結果をざっと列挙しただけで、それらの結果が、 制御熱核融合に挑戦している幾千もの研究チームが到達しているレベルにまったく劣 らないレベルにあることが分かる。それらの制御熱核融合研究チームの中に、コルニ ロワが得た結果のうち、せめて1つ(例えば、液体流のキャビテーション時における 異常な放射現象と熱現象,あるいはキャビテーション時に形成される非減衰性熱波, あるいは熱波場中に存在する重水素化チタンによるアルファ粒子の生成)についてで も、その再現に取り組もうとするチームはないのであろうか? 彼女のすべての研究 結果は杳読付き雑誌で発表されたものであり、信頼に値する。しかし、それらの結果 を再現しあるいは反証することの,何がいけないのか? 実は, A.A.コルニロワによる 実験的研究の結果は,制御熱核融合が向かっている方向を全部無に帰し,半世紀前に 選ばれた核融合への道が正当化され得ない巨額の費用を必要とするにもかかわらず、 制御核融合問題の解決をもたらさないであろうことを示している。それよりはるかに 手頃で安価な手段が存在する。トカマク方式の装置に閉じこもるのではなく、別の核 融合の方向を探す必要がある。ロシア科学アカデミー会員ロベルト・イスカンドロヴ ィッチ・ニグマトゥリン [Robert Iskandrovich Nigmatulin] によるキャビテーションの領域 における研究 [17], またバウマン記念モスクワ国立工科大学の研究者たちによる研究 [18] も忘れてはならない。A.A.コルニロワと R.I.ニグマトゥリンによる研究は制御核 124 [付録] 21 世紀の錬金術師たち

融合の新たな研究方向の基礎となることができる。

# 文 献

- 1. Библиографический указатель работ А.А. Корниловой, <u>https://yadi.sk/i/4ennVdGr3ZkuT7</u>
- 2. К. Луи Кервран, «Доводы в биологии трансмутаций при слабых энергиях»,1975г., https://www.4shared.com/web/preview/pdf/2G3HOux\_
- 3. Высоцкий В.И., Корнилова А.А., «Трансмутация радионуклидов в биологических системах реанимация фантазии алхимии или лабораторная реальность?», Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2014, Т. 6, №1, с. 99-109., <a href="https://cyberleninka.ru/article/n/transmutatsiya-radionuklidov-v-biologicheskih-sistemah-reanimatsiya-fantazii-alhimii-ili-laboratornaya-realnost/viewer">https://cyberleninka.ru/article/n/transmutatsiya-radionuklidov-v-biologicheskih-sistemah-reanimatsiya-fantazii-alhimii-ili-laboratornaya-realnost/viewer</a>
- Высоцкий В.И., Корнилова А.А., «Ядерные реакции и трансмутация изотопов в биологических системах (предыстория, текущее состояние, перспективы)», Журнал Формирующихся Направлений Науки, номер 17-18(5), стр. 34-42, 2017 (2018), <u>http://www.unconv-science.org/pdf/17/vysotskiy1-ru.pdf</u>
- 5. В.И. Высоцкий, А.А. Корнилова, "Ядерный синтез и трансмутация изотопов в биологических системах", Изд-во Мир, <u>https://yadi.sk/i/OCqzzw2cjK9yi</u>
- 6. Александр Просвирнов, «Атомный проект 2.0 будет «холодным», <u>https://regnum.ru/news/2398619.html</u>
- 7. Kyu-Jin Yum и др., «An Experiment in Reducing the Radioactivity of Radionuclide (137Cs) with Multi-component Microorganisms of 10 Strains», Korea Research Institute of Standards and Science, Yuseong District, Daejeon, South Korea, JOURNAL OF CONDENSED MATTER NUCLEAR SCIENCE, Volume 28, February 2019,

https://www.lenr-canr.org/acrobat/BiberianJPjcondensedza.pdf

- А.А.Корнилова, В.И.Высоцкий, А.И.Колдамасов, Hyun Ik Yang, Denis B. McConnell, А.В.Десятов, «Генерация интенсивного направленного излучения при быстром движении струи жидкости сквозь узкие диэлектрические каналы», Поверхность, №3 (2007) с. 55-60, <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=9515774</u>
- 9. В.И.Высоцкий, А.А.Корнилова, А.О.Василенко, В.И.Томак, «Обнаружение и исследование незатухающих температурных волн, возбуждаемых при кавитации струи воды», Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2014, № 11, с. 106–112, <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=22403855</u>
- 10. А.А.Корнилова, В.И.Высоцкий, Н.Н.Сысоев, Н.К. Литвин, В.И.Томак, А.А.Барзов, «Генерация интенсивного рентгеновского излучения при выходе быстрой струи воды из металлического канала в атмосферу», Поверхность, №12 (2010) С.53-63, <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=15538564</u>
- 11. В.И.Высоцкий, А.А.Корнилова, Ю.В. Корнеева, Т.Б. Крит, Исследование аномальных радиационных и тепловых явлений при кавитации струи жидкости. Часть 1. аномальные эффекты при генерация рентгеновского излучения стимулированного процессом кавитации жидкости, «Инженерная физика», №2, 33-45, 2016, <a href="https://yadi.sk/i/slfUhQdIFH6AYO">https://yadi.sk/i/slfUhQdIFH6AYO</a>
- 12. В.И. Высоцкий, А.А. Корнилова, А.О. Василенко, В.И. Томак, Ю.В. Корнеева, Т.Б. Крит, М.В. Высоцкий, Исследование аномальных радиационных и тепловых явлений при кавитации струи жидкости. Часть 2. Генерация и исследование незатухающих тепловых волн, формируемых при кавитации, «Инженерная физика», №4, 9-20, 2016, <u>https://yadi.sk/i/LU0HNANyuryENA</u>

13. Корнилова А.А., Высоцкий В.И., Сапожников Ю.А., Власова И.Э., Гайдамака С.Н., Новакова А.А., Авдюхина В.М., Левин И.С., Высоцкий М.В., Хаит Е.И., Волкова Н.Х., «Проблема и реализация устойчивой генерации альфа-частиц дейтерированным титаном, находящимся в поле тепловой волны», Инженерная физика, 2018, №5,013-022,DOI:10.25791/infizik.05.2018.009,

http://lenr.seplm.ru/articles/aa-kornilova-generatsiya-alfa-chastits-deiterirovannymtitanom

14. Alla Kornilova, Bladimir Vysotskii, Runar Kuzmin, "Stimulation of LENR in Hydroborate Minerals Under the Action of Distant High-Frequency Thermal Waves», 21 International Conference on Condensed Matter Nuclear Science, Colorado State, Univ., Colorado, USA, 3-8 June 2018, Program and Abstracts, p.53,

http://coldfusioncommunity.net/wpcontent/uploads/2018/05/Kornilova-Alla-1.pdf

- Vysotskii V. I., Kornilova A., et al. «Stimulated (B11, p) LENR and Emission of Nuclear Particles in Hydroborates in the Region of Phase Transfer Point», J. Condensed Matter Nucl. Sci. 13, (2014), p 608, <u>http://www.iscmns.org/CMNS/JCMNS-Vol13.pdf#page=618</u>
- 16. «Чистая энергия за копейки», <u>https://habr.com/ru/post/397025/</u>
- 17. Р.И.Нигматулин и др., «О термоядерных процессах в кавитирующих пузырьках», 2014г., журнал "Успехи физических наук", том 184 № 9, <a href="http://www.mathnet.ru/links/2bac52718a1b59606d15cb286a7398bc/ufn4916.pdf">http://www.mathnet.ru/links/2bac52718a1b59606d15cb286a7398bc/ufn4916.pdf</a>
- 18. Пильгунов В.Н., Ефремова К.Д., «Светоизлучение и электрические процессы в кавитирующем потоке минерального масла», Наука и образование, научное издание МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2013. № 3, стр. 31-62., <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=19013240</u>