

原子力と他分野技術の境界推進に関する調査

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究報告書)

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
T	J1575 94-001	1994.6.28
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

1994年3月

原子力と他分野技術の境界分野の研究推進に関する調査

目 次

1. 始めに
2. 調査の目的と方法
 - 2-1 調査の目的
 - 2-2 調査の方法
3. 材料開発と応用可能性
 - 3-1 耐硝酸環境材料
 - 3-2 液体ナトリウム
 - 3-3 劣化ウラン
 - 3-4 原子力における材料開発の特色と他分野での応用可能性
4. 隔離・密閉技術
 - 4-1 ガラス固化施設の隔離技術
 - 4-2 原子力における隔離技術の特色と他分野での応用可能性
5. コンピューター利用と情報化
 - 5-1 研究開発、運転管理、建設におけるコンピューター利用
 - 5-2 核物質管理におけるコンピューター利用
 - 5-3 地下の地盤特性の推定
 - 5-4 原子力におけるコンピュータ利用の特色と他分野での応用可能性
6. 文化として見た原子力技術
 - 6-1 文化として見た原子力技術
 - 6-2 原子力文化の特色と一般化の可能性
7. 原子力技術と周辺技術の交流の可能性
 - 7-1 原子力技術の特色
 - 7-2 交流の阻害要因
 - 7-3 潜在的交流の可能性
 - 7-4 技術交流の潜在可能分野としての医療と宇宙
8. 原子力分野が他分野と交流を促進するための提言と今後の課題
 - 8-1 提言と課題
 - 8-2 動燃事業団の役割
9. 調査委員会の構成
10. 付属資料及び別紙資料

1. 始めに

かつて米国のアポロ計画が盛んであった時代、「波及効果」という言葉がたびたび使われた。宇宙という極限状態で使われる技術が、通常の科学技術に大きな刺激を与え、個別の分野でも、全体としても、科学技術の進歩に貢献するというのが波及効果である。人間を月に運ぶというプロジェクトが、実社会での効用に結びつかなかったことに対するある種の言い訳ではあった。しかし、現実にも材料開発、システム工学の提案などの面で他の分野に大きな刺激になったことは否定できない。

しかし、宇宙開発と並ぶビッグプロジェクトである原子力では、波及効果という言葉が使われることは稀である。宇宙と違い、エネルギーという現実的な目的が厳然と存在するため、特に波及効果を強調する必要がなかったという側面があるのは確かである。とはいえ、莫大な経費をつぎ込んだ研究開発の成果のうちには、他分野で役に立つ技術は多いはずである。放射線環境という特殊な世界で通用する技術が他の分野の参考にならないはずはない。安全性という面できびしい条件を課された原子力の技術や思想は、他分野を刺激するはずである。勿論、小型で大きなエネルギーを取り出せる原子炉を宇宙開発などで積極的に利用することもある。宇宙開発と同等、もしくはそれ以上に波及効果があっても不思議のないのが原子力開発であろう。

1987年に策定された現行の原子力開発利用長期計画は、原子力政策をエネルギー政策としてばかりでなく、科学技術政策という側面からも考えることを提唱した。その長計は現在、改訂作業が進められているが、科学技術政策という側面を一層重視する方向で検討が進められている。この考え方に対する長計での力点は、基礎研究重視という科学技術政策の方向に沿って、原子力という立場からより基礎的な研究に取り組むことにある。これも重要な施策ではあるが、それにもまして大切なことは、原子力の技術と他の分野との交流を活発化することである。

このような目で、これまでの原子力分野の技術開発を見ると、必ずしも原子力分野が技術交流に積極的であったとはいいがたい。というより、特殊な分野の特殊な技術という感が強かった。原子力に関わる研究開発は、もっぱら原子力委員会の検討にまかされており（大学における研究をのぞく）、自己完結的に進められてきた。さらに、軍事技術から始まったという不幸な出生も手伝い、核物質防護や核不拡散という視点から情報公開に慎重になり、他分野との交流が困難という面もあった。また、エネルギー開発という目的意識が強く、わき目も振らず目的にまいしんしたという見方もできる。いずれにせよ、潜在的には大きな波及効果が期待できるにも関わらず、これまでのところ原子力に関する技術開発が他分野で花開いたという例は少ない。

日本の科学技術は今や大きな曲がり角にきている。かつては何事によらず、欧米先進国を先例として目標を定め、まっしぐらに研究開発を進めることができた。その結果、極めて効率よく技術水準を向上することができ、いつのまにか世界でも最

先端を走る国の一つになってしまった。もはや、欧米先進国に先例を見いだすことも難しく、独自でフロンティアを開かざるを得なくなっている。

原子力とて例外ではない。高速増殖炉（FBR）「もんじゅ」の臨界は、欧米先進国がFBR開発で息切れした段階の出発である。これから予想される様々な技術課題への挑戦、思想の確立には、従来以上に創造的な取り組みが求められる。他分野との広い交流は原子力分野での挑戦にも大きな刺激になるはずである。

このような状況を考えると、多額の費用を投じた原子力開発の成果を原子力の世界だけに留めるのは大いなる損失である。核物質防護や核不拡散という点に配慮せざるを得ないことは当然としても、積極的に原子力で培った科学技術や思想を広く社会に問うべき時代にきている。

原子力が自分の世界だけに留まっていれば、従来からの原子力の常識を越えることはできない。波及効果で他の分野へ刺激を与えるという意味だけではなく、原子力の研究開発力を質的に向上する意味でも、原子力と他分野との交流は必要であろう。

このような視点から日経産業消費研究所では「原子力と他分野の境界分野の研究推進に関する調査」の研究会を組織し、代表的な原子力技術について他分野での応用可能性を検討した。それと同時に、原子力分野だけでなく原子力文化についても検討を加え、同文化の普遍化の可能性を検討した。

なお、研究会に参加して頂いた各委員の方々、研究会を進めるに当たり、原子力技術の詳細について情報提供をして下さった各原子力関係機関やメーカーの技術者の方々に感謝する。

1994年3月

日経産業消費研究所研究部長

原 征 夫

2. 調査の目的と方法

2-1 調査の目的

原子力技術の将来展望として、より柔軟な原子力技術開発の推進方策を検討するためには原子力以外の分野との有機的な連携が必要である。連携には様々なレベル、分野、形態を対象に考えることができる。その連携のモデルができれば、従来ハイテクの粋を集めながら他分野との交流があまり無かった原子力技術の他産業への移転および利用が進むと考えられる。他分野との連携については技術だけでなく、文化、社会との共存を含めた広い意味での可能性を調査、検討する。これにより社会、文化と原子力技術との関わり合いがよりスムーズになる道を探る。

2-2 調査の方法

まず原子力開発の基盤的技術を整理し、技術の汎用的浸透と発展が可能な分野を抽出する。また、先導的技術を創出している分野と原子力の関連を技術の性格から評価し、連携の方策を検討する。

また将来に向けての産業牽引ポテンシャルと資質について、これまでの科学技術の高度化、研究基盤の拡充、次世代技術者の発掘・育成などに、原子力がどのような役割を担ってきたかを整理する。さらに今後の原子力技術の位置付けを、先端、革新、総合といったハイテクの視点に限定することなく、伝統的、職人的、芸術的視野も含めた科学技術文明という座標の中で明確化する。

連携のモデルとして医療分野、及び宇宙分野を対象にして連携して開発可能なターゲットなどについて検討する。

3. 材料開発と応用可能性

3-1 再処理分野における材料技術開発

・再処理プロセスでの腐食問題

使用済み燃料の再処理工場では高密度の中性子束の存在は考えにくいいため、原子のはじき出しによる材料劣化、フレッチング疲労（金属疲労の1つ）などの要因はそれほど大きくない。それよりも、化学的な腐食、材料の損傷という要因が大きく影響する。現在のプロセスは使用済み燃料の溶解液として硝酸を使っているため、一般産業界の硝酸化学プラントに類似した悩みを構造的に抱えているといえる。

動燃事業団の東海工場も硝酸を溶解液として使っているため、硝酸化学プラントのように、酸化性の酸である硝酸に材料が耐えられるよう、通常の炭素鋼でなく、Ni、Crを鋼に加えたオーステナイト系ステンレス鋼を採用している。ステンレス鋼、Ti、Zrなどは硝酸液中で酸化被膜を形成するため、再処理プロセスでも材料の候補として望ましい。

再処理プロセスの特有の問題点は、放射線、核燃料物質、核分裂生成などの特殊事情を考慮しなければいけないことだ。放射線を例にとれば、 γ 線の照射と材料の腐食に相関性があることが知られている。

・耐食材料の有効性

東海工場では機器・配管材料に、SUS304Lを中心にオーステナイト系ステンレス鋼が使われている。激しい腐食が予想される個所には炭素含有量を減らした極低炭素ステンレス鋼やTi材を使っている（図表-3.1）。

前述したように、ステンレス鋼は加工性の良さや、コスト面の理由から、東海工場でも最も多く利用されている。表面の酸化膜が安定なため、耐食性も高い。ただ、鋼中のC、Pなどの含有量、熱処理条件の要因が腐食に影響するため、製造時には配慮が必要。Ti、Zrではこうした因子の影響があまりないことから、高い耐食性が求められている個所でステンレス鋼の代替品として有効となる。

・大洗工学センターでの研究動向

構造材料研究開発の目的は、高速炉の構造的な安全性、耐久性、信頼性を確保するための材料解析手法や、評価手法を確立することに主眼が置かれている。これらの研究はプラントの設計、建設から実際の運転操業に至るまで、あらゆる面で材料の妥当性を支えるものであり、信頼性確立のためにはなくてはならない研究である。

大洗工学センターでは「常陽」段階で、ナトリウムの材料強度に与える影響評価など設計用の指針を作成。それに続く「もんじゅ」段階ではプラントの大型化、高温化といった新しい局面を迎えて、より幅広い材料研究を行った。

まず、高温構造設計基準の開発が挙げられる。この基準は材料試験、構造解析法、構造物試験の3つに大別される。材料試験では材料強度の基準値などを提供。構造

解析法では応力、ひずみなどの材料挙動の的確な把握を目的に、簡易評価法なども提案している。構造物試験は、材料・構造物の強度を模擬環境で試し、検証する役割を持っている。ほかには、ナトリウム、中性子照射、水・水蒸気が材料にもたらす機械的な物性変化や損傷メカニズムを解明し、材料の信頼性を確保する「環境効果評価」などがある。これらの成果はデータベース、汎用非線構造解析システム「FINAS」などの形でまとめられている。

3-2 液体ナトリウム

・FBRへのナトリウムの適合性及び特性

ナトリウムの特性(図表-3.2)に配慮して、高速炉で使われている材料例としては、原子炉容器、1次系ポンプ機器などに採用されているSUS304や炉心を構成するSUS316が挙げられる。高速炉でナトリウムが冷却材に使われている一番の理由は熱伝導性が高く、熱媒体として優れているためである。ほかにも<1>比重が1以下で軽く、ポンプ駆動力が少なくすむ<2>酸素濃度が約10ppm以下ならば、Fe、Ni、Cr、Coなどと共存性がよく、ステンレス鋼との相性がいい<3>U、Th、Puの金属、酸化物、炭化物、窒化物などとの共存性が高いなどの理由がある(図表-3.3)。

・ナトリウム用材料の研究課題

原子炉・機器材料にとってナトリウム用材料開発研究の項目にはまず腐食の問題がある。温度や時系列での物性変化に注意が必要であるし、酸素濃度やナトリウム流速も腐食の大きな要因になりうる。純度管理などの手法で、孔食、粒界腐食を生じないように材料設計が求められる。焼鈍材などを使うことで、耐性を高める研究もある。また、ナトリウム中と大気中では材料の疲労寿命が異なることにも注意する必要がある。ナトリウム中では酸化の影響を受けにくい(図表-3.4)、材料の機械的強度を的確に把握することが求められる。

3-3 劣化ウラン

・劣化ウランの生成の仕組み

劣化ウランは天然で存在比約0.7%のU235を4~5%に濃縮する過程で発生するU235が0.2~0.3%になったものを呼ぶ。通常はフッ素を付加して、UF6として保存している。貯蔵の際は、フッ化物を安定な形態にするため、ボンベの中で固体として存在させている。特性としては、高密度で加工性の良さがある。遮蔽性も高く、電子構造的にも特異な化学的性質を持つ。合金化で強度や耐食性が高まることも知られている。

・劣化ウランの処理問題

100tの濃縮ウランで300tの劣化ウランが生成し、軽水炉を例にとると1基3年間で300tの劣化ウランを生み出す。軽水炉の耐用年数が30年と想定すると、運転期間中に3000tの劣化ウランを排出する計算になる。青森県六ヶ所村の濃縮工場が予定通り1500SWUで稼働すると1000数百tの劣化ウランが発生することになる。劣化ウランをFBRで使用しても、使い切れない量が余る。現在はUF6の形で効率的に貯蔵するための検討がなされているが、利用という別の視点が欠如している。その観点からの検討も今後必要になってくるであろう。

・ウラン合金の特性

ウランはそのままと、耐食性が低く、空気中、水中いずれでも酸化が進みやすいのに対し、ウラン合金は前述したように、強度や耐食性に優れている。U-Mo、U-Tiなどは、高温での機械的性質が優れるとともに、耐食性にも富んでいる。U-Alはウランと金属間化合物を形成する。ウランを少量添加すると、結晶が微細化されて機械的性質が向上する。大量に添加すると、延性が高まり、加工性が高まるという性質を持つ(図表-3.5)。

現在、日本にはウランを核燃料以外の観点から研究している研究者は数10人にとどまっているが、基本材料としてのウラン(アクチニド)の持つ潜在的可能性を理解する層は着実に増えている。また、金属材料研究で評価の高い東北大学でも、ウランを活用した超電導材料や高純度金属の開発・製造に取り組むなど、研究の輪は広がっていると言える。

・求められる法規制の柔軟運用

かつては陶芸の上薬としても使われていた天然ウランだが、現在では例え劣化ウランであっても核燃料物質は厳しい法規制が敷かれ、容易には取り扱えない状態となっている。海外では、RIの容器の遮蔽材として劣化ウランが使用されている例があるが、日本では法規制上まず不可能である。燃料以外の用途への配慮がなされおらず、厳しい使用制限の中で、劣化ウランの用途が厳しく限定されているのが実

ランは持っている。前述したように、FBRでも処理しきれない量の劣化ウランが存在する以上、人体に害がないという最低限の条件をクリアした上で、積極活用するという視点が考えられてもいいと思われる。

3-4 原子力における材料開発の特色と他分野での応用可能性

・耐久性、耐食性指向の研究開発

ナトリウム用材料、再処理プロセスでの構造材料など、原子力の材料開発は信頼性、安全性といった社会のさまざまな要請から、耐久性、耐食性の向上を目的に研究され、成果もあがってきた。最近ではピンホール腐食といった一部の腐食が問題になっており、研究も進んでいる。原子力で生まれた技術もなかなか民生用など外部にフィードバックされることが少なかったが、高い信頼性を持つ材料開発の技術は今後、日本の産業界でも広く利用される可能性があるだろう。

・リサイクル技術としての展開

再処理工場では腐食が再処理中は起きないことを目的に材料開発がなされてきた。大洗工学センターの実験炉「常陽」の純度管理研究で酸化被膜を形成すると配管の寿命が延びることがわかり、原型炉「もんじゅ」で実際に応用している。エンジニアリングの世界では腐食したら、すぐ取り換えがきくという設計が大切だが、原子力の場合は腐食が極力起きないという逆の強想が働いてきた。リサイクルという観点で眺めると取り換えが容易ということも、材料が長持ちするということも、コインの裏表の関係であり、腐食メカニズムの研究は各方面で転用が可能と思われる。腐食のモニタリング技術などは化学プラントなどに応用できるであろう。

・劣化ウランの用途開発

合金化で強度、耐食性が向上する劣化ウランの用途は幅広く考えられる。ガラスの着色剤など試薬、染料としての利用はもちろん、遮蔽性を生かして線源照射装置の遮蔽や、遮蔽用のセラミックレンガも実際に考えられている。今後、応用が期待できる分野として、機能材としての用途開発が挙げられよう。水素吸蔵材としては、電力貯蔵、核融合でのトリチウム貯蔵など水素吸蔵システムが考えられる。また、キュリー温度が高いウラン化合物の磁気光学効果を検討し、光磁気メモリーとしての開発も期待できよう。

・液体ナトリウムの利用可能性

原子力で冷却材として使われているナトリウムはやはり冷却材としての利用が最も有力と考えられる。ソーラーコネクターなど熱交換器として転用できよう。容量の問題から、あまり小型化は期待できないが、ヒートパイプ程度なら、十分利用できる。大学などの研究機関では、危険物扱いされ有機剤中に保存しているが、動燃事業団で試験に供してきたナトリウムは表面に有機剤が付着していないものを使用している。これを水の中に入れても発火しないことが判明している。ナトリウムの産業利用を考えるには、こうした先入観を破っていくことも必要だろう。自動車業界の一部でもバルブにナトリウムを利用しているケースがあり、大学やメーカーと

利用方法を共同研究することも検討されてよいだろう。 ■

東海工場の主要機器

機 器 名	材 質	備 考
溶解槽 (R10)	URANUS65	
溶解槽 (R11)	URANUS65	
溶解槽 (R12)	NAR310Nb	追加設置
ウラン溶液蒸発缶 (第1段)	SUS304L	
ウラン溶液蒸発缶 (第2段)	Ti	
プルトニウム溶液蒸発缶	塔部: SUS304L、下部: Ti	塔部Ti-5Taに 変更予定
酸回収蒸発缶	1代目: URANUS65	
	2代目: CRONIFER2520Nb	
	3代目 (加熱部のみ交換): NAR310Nb	Ti-5Taに 変更予定
酸回収精留缶	塔部: SUS304L、 下部: SUS310S (ULC)	
高放射能系溶液蒸発缶	URANUS65	

(図表-3.1)

ナトリウムの物性値

原子番号	11
原子量	22.99
融点	97.8 °C
沸点	883. °C
密度 (300 °C)	0.880 g/cm ³
融解体積膨張	2.7 %
融解潜熱	27.05 cal/g
蒸発潜熱	925.6 cal/g

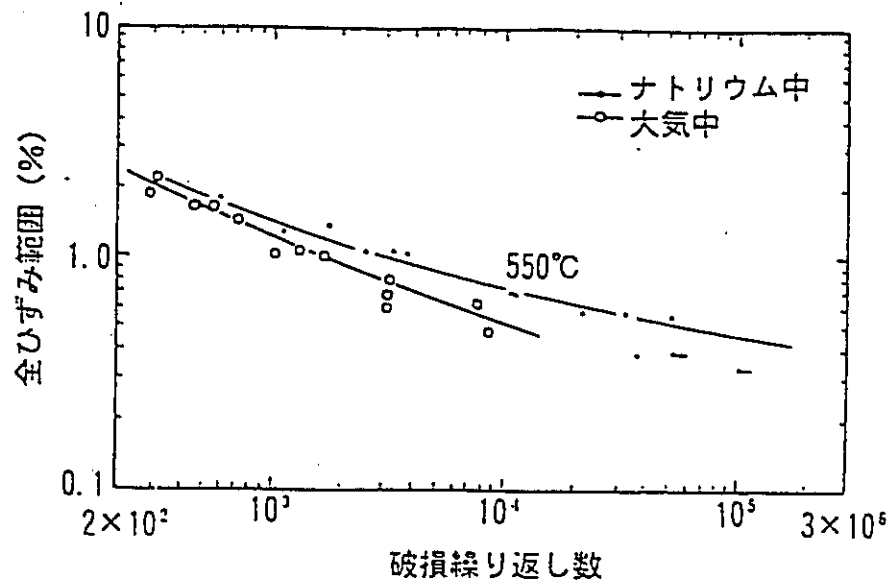
(図表-3.2)

格差材と冷却材との両立性 (共存性)

金属材料	℃	Na または NaK			Li		
		299	593	799	299	593	799
ステンレス鋼							
310SS		○	○	○	○	△	×
316SS		○	○	○	○	△	×
347SS		○	○	○	○	△	×
チタン合金							
Cr		○	○	○	—	—	—
70Fe, 25Cr, 5Al		○	○	○	—	—	—
60Cr, 40Fe		○	○	○	—	—	—
60Cr, 25Fe, 15Mo		○	○	○	—	—	—
ニッケル合金							
Ni		○	○	○	△	×	×
インコネル 702		○	○	○	○	×	×
ハステロイ X		○	○	○	—	—	—
ジルコニウム合金							
Zr		○	○	—	○	○	○
ジルカ=イ-2		○	○	—	○	—	—
ジルカ=イ-4		○	○	—	○	—	—
ニオブ合金							
Nb		○	○	○	○	○	○
Nb-0.7Zr		—	—	—	—	—	—
Nb, 15W, 5Mo, 1Zr		—	—	—	—	—	—
アルミニウム							
Al		○	○	×	—	×	×
6063		○	○	×	—	×	×
M-353		○	○	×	—	×	×
SAP		○	○	×	—	×	×

○=良, △=中間, ×=不良

(図表-3.3)



ナトリウム中と大気中における
SUS304鋼の疲労寿命の比較

(図表-3.4)

金属ウランと主なウラン合金の特徴

合金種類	合金の特徴
U	<p>α相とβ相は異方性を持ち熱サイクル成長を示す。特に圧延処理した場合に著しいが、β焼入処理により除去することができる。また鑄造ウランは方向性が見られない。耐蝕性が低く、塊状ウランでも空气中、水中で酸化が進む。</p>
U-Mo U-Ti U-Zr U-Nb	<p>準安定なγ相を形成するので異方性が除かれる。また、高温での機械的性質が優れるとともに、耐蝕性に富む。</p>
U-Al U-Si	<p>ウランと金属間化合物を形成し、少量の添加で結晶が微細化されて機械的性質が改善される。また、大量に添加されると、延性が増し加工性が改善される。</p>
U-Pb U-Sn U-Cu	<p>2成分又は3成分合金で、耐腐蝕性に富む。</p>
U-Mo-Nb- Zr-Ti	<p>Quad, Quintと呼ばれる多成分合金で強度に優れる。</p>

(図表-3.5)

4. 隔離・密閉技術

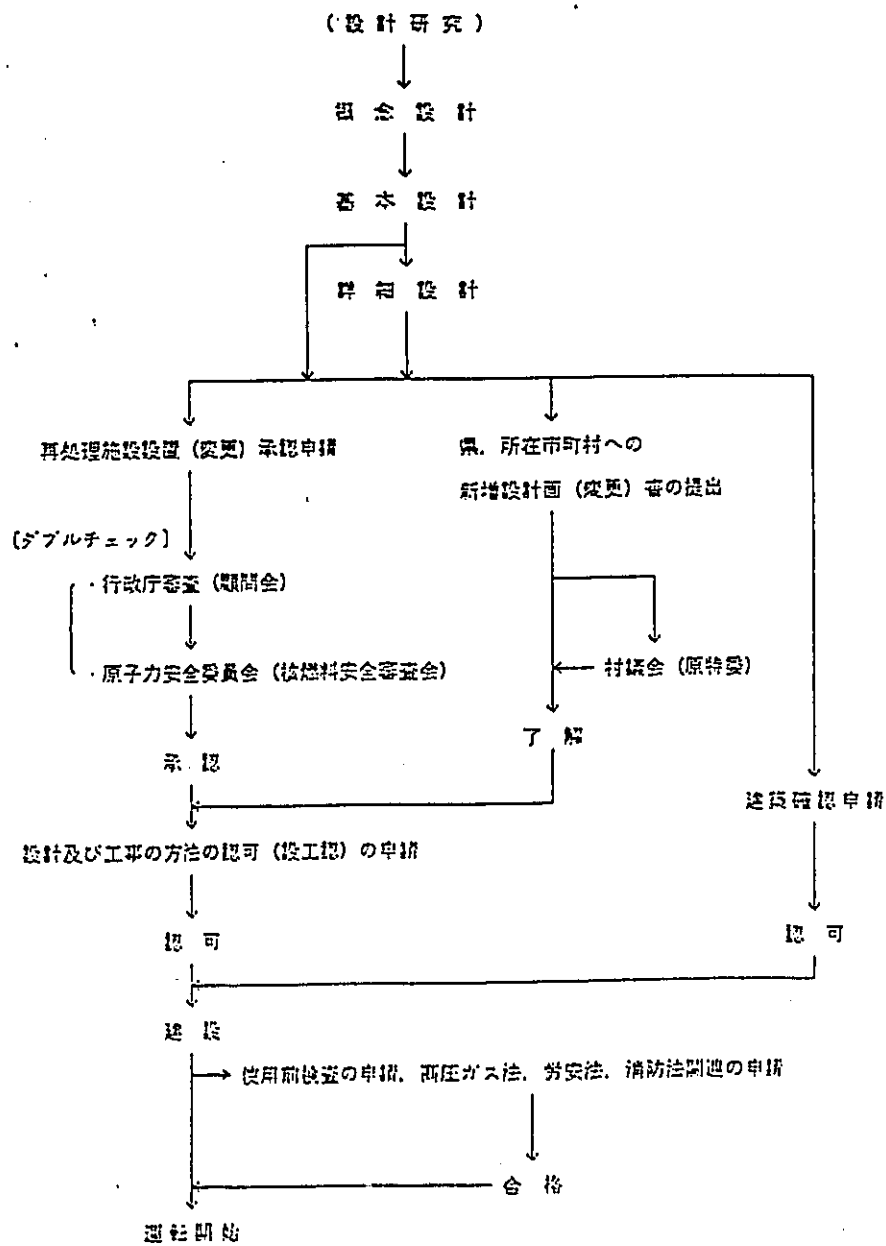
4-1 ガラス固化施設の隔離技術

・再処理施設に関する法規制

ガラス固化施設は再処理施設の一部である。再処理施設にガラス固化等の新たな施設を付加する場合、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」に基づき、次のプロセスで進められる。まず、動燃事業団が設計し、再処理施設設置（変更）承認申請を国に提出。これは行政庁と原子力安全委員会という2重の審査を経て、承認となる。また、建設予定地の県や市長村へも同様に、新增設計画（変更）書を提出し、了解を得なければならない。次に、設計及び工事の方法の認可を申請し、認可された後、建設が始まる。

法律に基づく「再処理施設安全審査基準」で指針が設けられている通り、周辺地域や施設作業員へ悪影響を及ぼさないため、隔離することが重要となる。実際には、再処理機器はセルと呼ぶ厚いコンクリートの部屋に閉じ込められ、さらに建物の外壁で覆う、という機器、セル、建物の3重の閉じ込め構造になっている。また、機器<セル<建物の順に負圧管理され放射化ガスが外に漏洩しないような配慮がなされている。

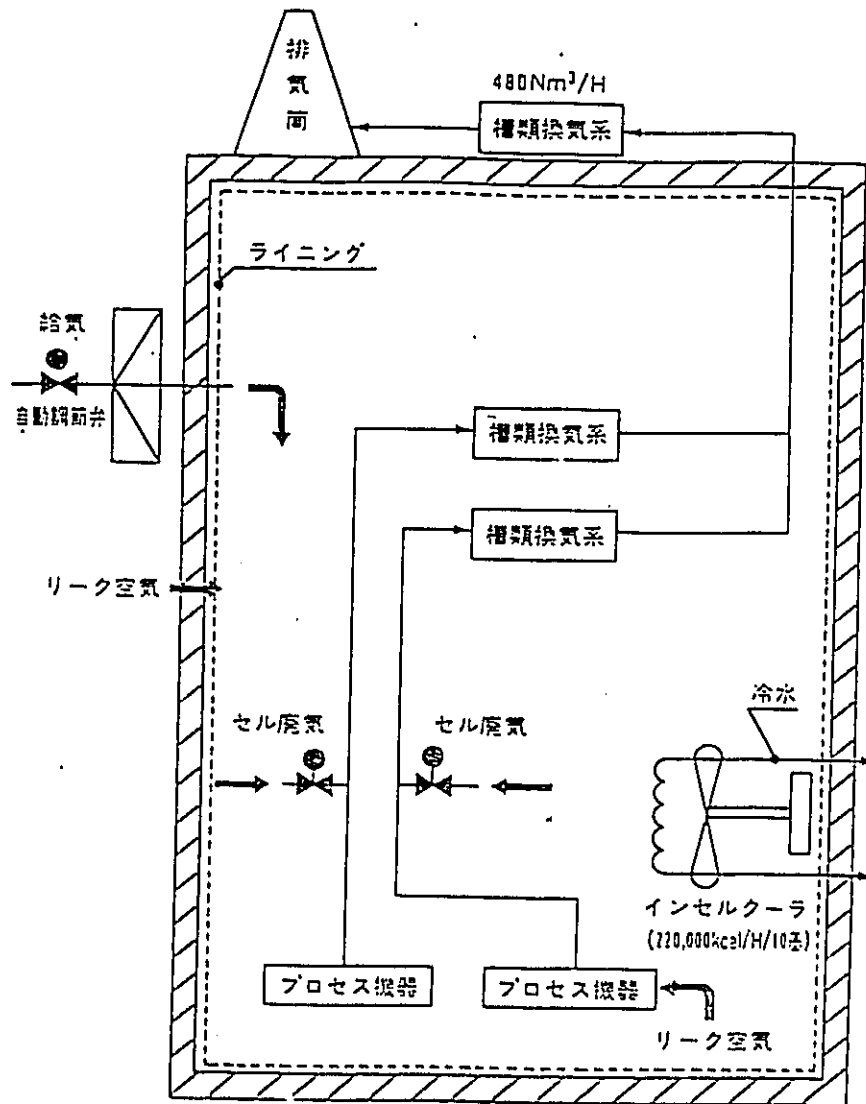
東海再処理工場の設計から運転まで



・全遠隔保守方式施設の様子と換気の新方式

厳重に隔離した施設で問題になるのは、装置の保守作業。放射性廃棄物を害がなくなるまで保存用に加工するためのガラス固化施設では、全遠隔保守方式を採用している。作業員の被曝量低減と施設の稼働率を下げないための措置。装置を保守するためにいったん施設を開けると、除線に数カ月かかる。大きさが27×13×17メートルのセル内には、凝縮器やインセルクーラーをセットにしたラック（寸法3×3×6.5メートル、重量20トン弱）が7つある。同じセル内に保守用ロボットも設置しており、保守作業はロボットを別室から遠隔で操作する方式である。

同施設では保守のほかに換気方式にも特色がある。同施設以外のセルでは、負圧や温度を一定に保つため、1時間あたり10～15回の空気の入れ替えを行い排気筒から放出している。このため定期的に運転中止中に行うフィルターの交換も大変な作業量になる。そこで、同施設ではローフローベンチレーション（LFV、低風量換気）方式を採用した。これは換気回数の制約条件の一つである核分裂生成物の崩壊熱によるセル内温度上昇をインセルクーラーにより冷却することにより、換気回数を少なくする方法である。

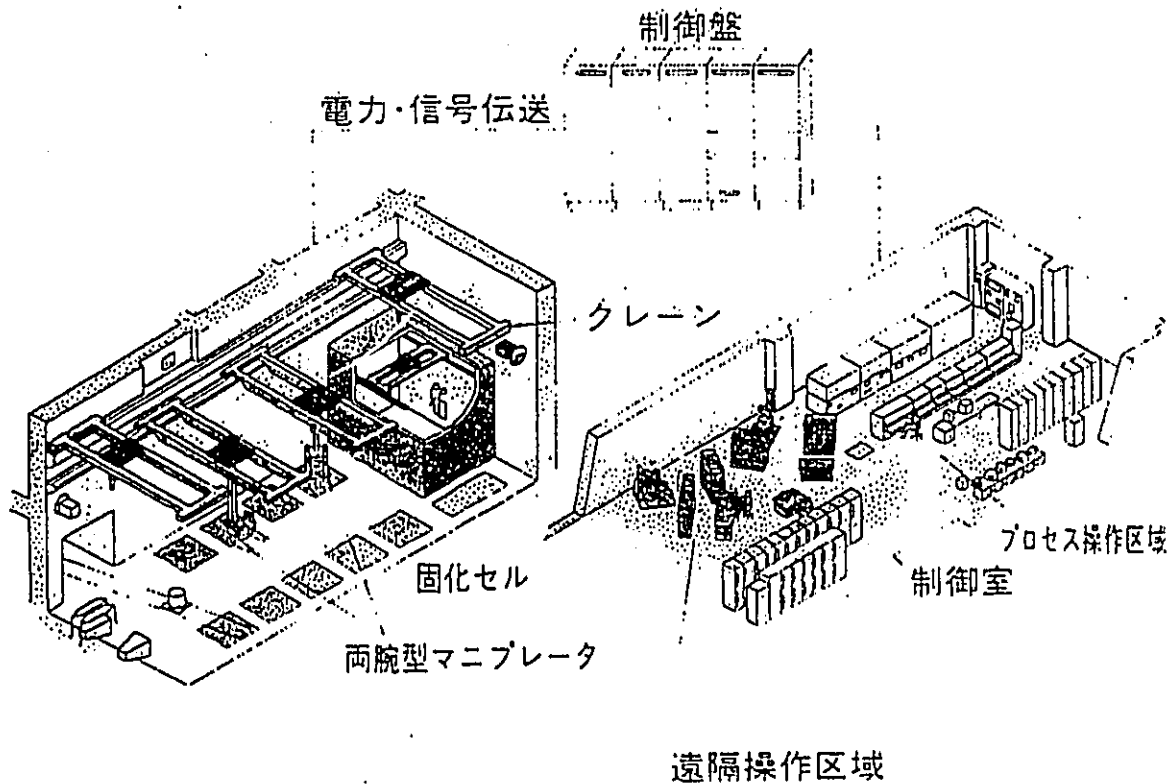


LFVの概念図

4-2 原子力における隔離技術の特色と他分野での応用可能性

・ 密閉施設の保守作業にロボットを使う技術

原子力施設では、ガラス固化施設で見られるように、人がいけない場所での作業を必要とするケースが多い。同施設では、ラックが故障した場合に同じセル内に設置したロボットを別室から操作して保守作業をする。ロボットは手足の機能とテレビカメラを備えている。カメラは上からや横から見た映像を数種類用意する。ロボットと同じ関節を備えたマスターアームを腕に付けたオペレーターが送られてくる映像を見ながらロボットを動かす。オペレーターには適性が必要であるほか、操作に熟練しなければならない。



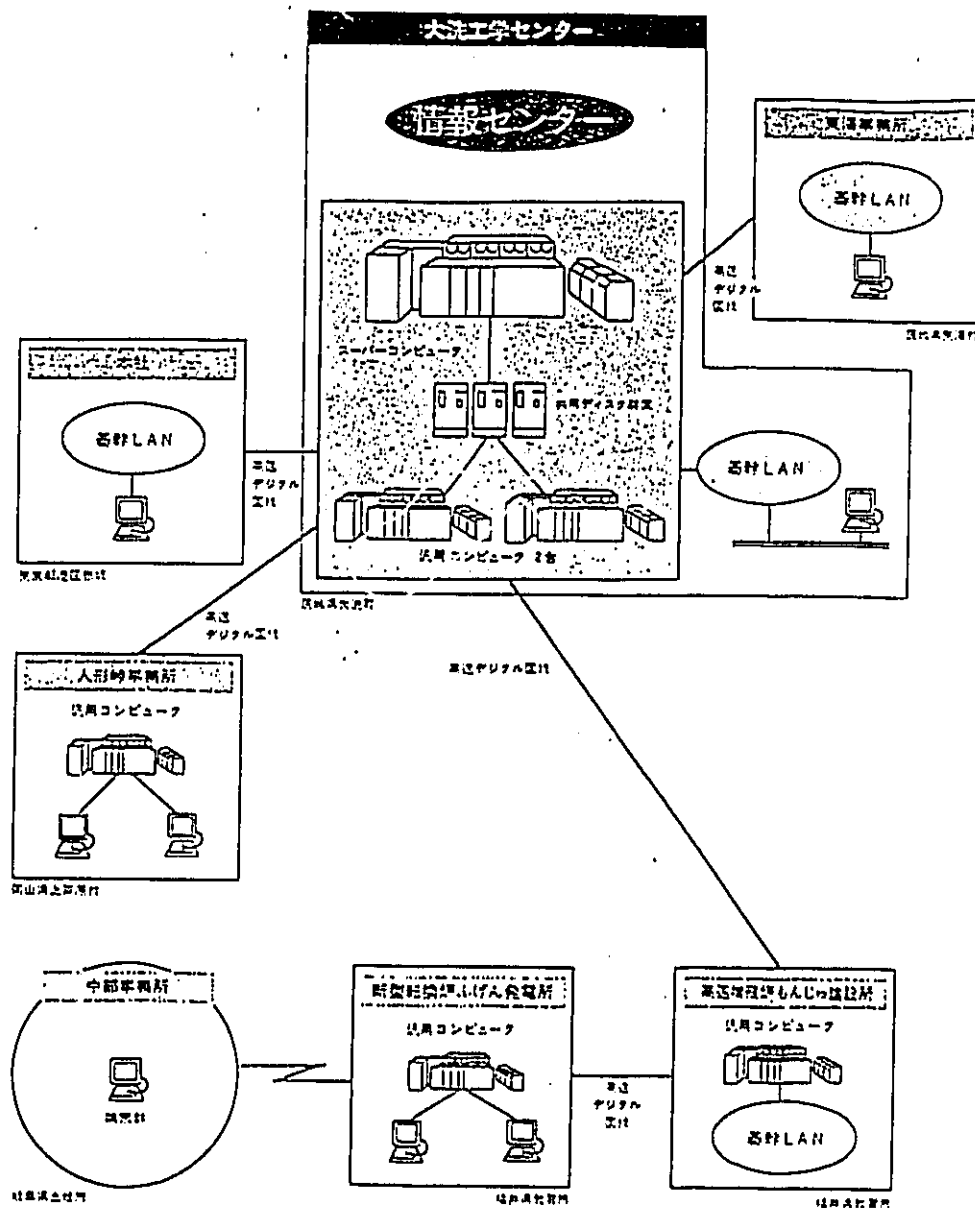
全遠隔保守方式の概念図

5. コンピューター利用と情報化

5-1 研究開発、運転管理、建設におけるコンピューターの利用

・動燃事業団における利用

同事業団ではコンピューターを新型炉および核燃料サイクル開発の基盤になる技術として利用を進めている。特にコンピューター利用の効率化や基盤的ソフトウェアの整備を図るとともに、情報インフラストラクチャーを充実するため、茨城県の大洗工学センター内に「情報センター」を設立している。コンピューターシステムのハードウェア構成はスーパーコンピューター（最大ベクトル性能5 GFLOPS）1台、汎用コンピューター（性能25MIPS）2台を中心に構成している（図表-5.1）。今後、超高速計算が可能な並列コンピューターの導入も予定している。

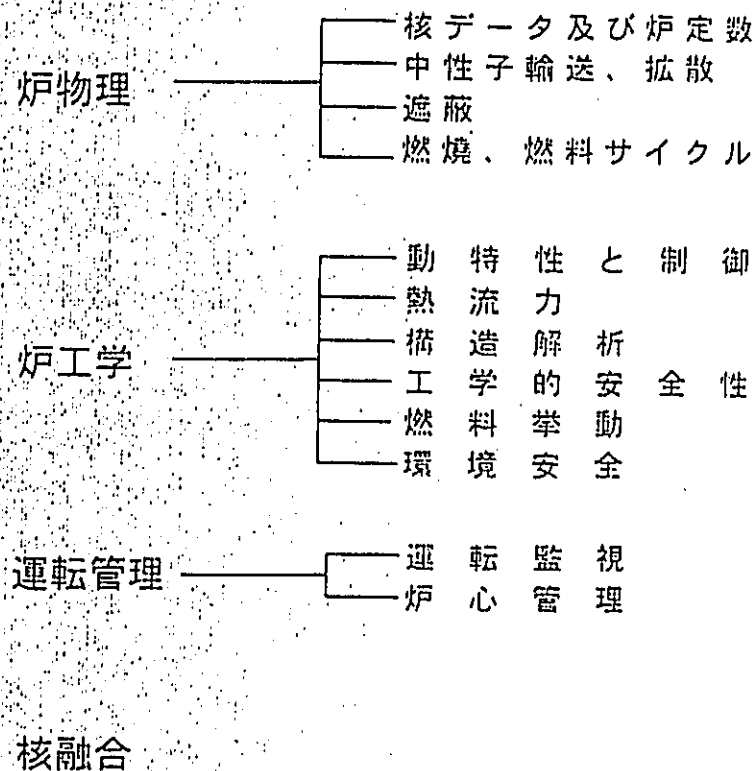


(図表-5.1)

・原子炉プラントにおける利用

大洗工学センターでは、原子炉プラントにおけるコンピューター利用として、炉物理、炉工学、運転管理などの分野のソフトウェアを開発している（図表-5.2、図表-5.3）。開発成果は汎用ソフトウェアとして外部に利用できるものもある。例えば「FINAS」は有限要素法による汎用構造解析システムである。「FINAS」はもともと高速増殖炉（FBR）用部品の全体的な構造設計や安全性の評価をサポートする目的で作られた。1976年から開発を進め、汎用ソフトウェアに成長させた。

原子炉コードの体系化



(図表-5.2)

原子力コード体系

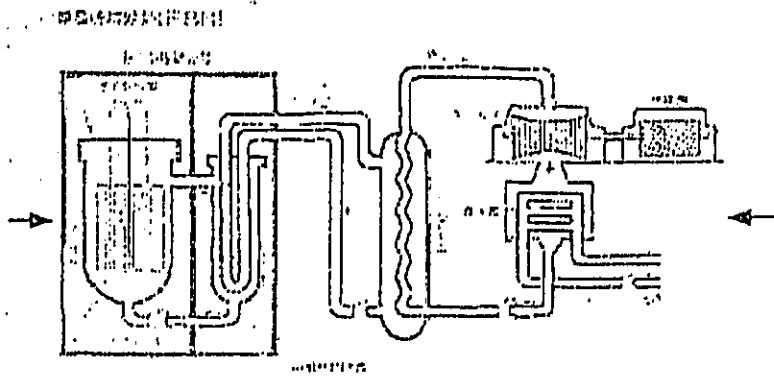
原子炉運転管理

構成

- ・炉心管理
- ・運転管理
- ・プラントメンテナンス
- ・放射線管理
- ・建設運転計画

役割

- ・プラントを能率的かつ安全に運転するための情報を得る。



研究・開発・設計構成

- ・炉物理（核データ、炉定数、中性子拡散、輸送、遮蔽）
- ・炉工学（動特性、制御、熱流動解析、構造解析）
- ・工学的安全性（原子炉事故時の挙動解析）
- ・燃料挙動
- ・環境安全性

役割

- ・プラント設計時に計算結果を設計データにフィードバック
- ・原子炉事故時の挙動解析をもとに安全審査の実施

事故時の安全解析

構成

- ・工学的安全性
- ・環境安全性

役割

- ・原子炉事故時に適切な措置を行なうための情報を得る。

(図表-5.3)

5-2 核物質管理への利用

・保障措置と核物質防護

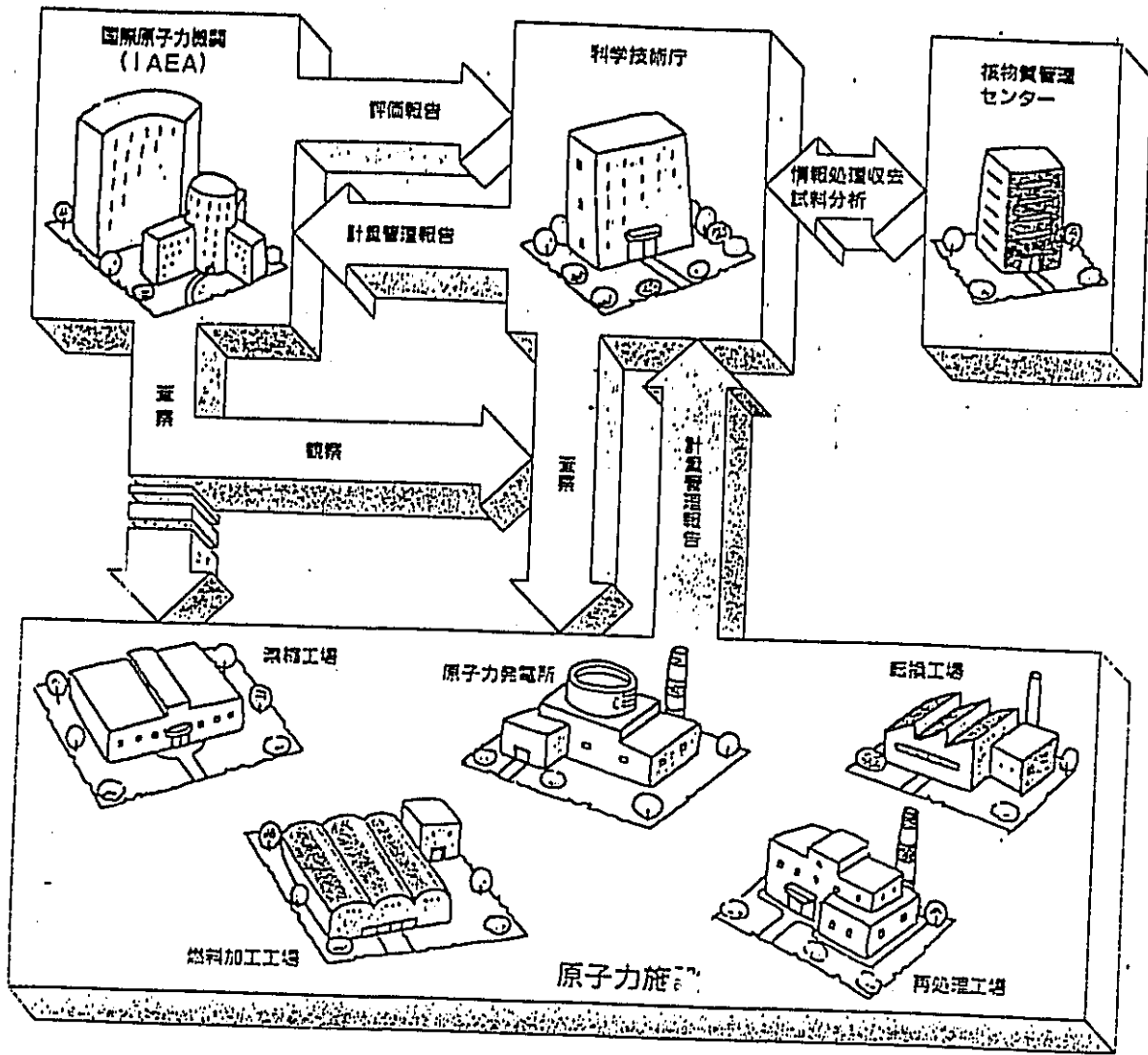
保障措置と核物質防護は核兵器の拡散を防ぐための重要な柱となるもので、そこにはコンピューター化された計測技術や遠隔監視技術が使われている。保障措置は、原子力の開発利用を平和目的に限定して行うためにウランやプルトニウムなどの核物質が核兵器の製造などに使用されていないことを確認するとともに、核兵器などの製造を計画しても早期に発見してそれを未然に防ごうというものだ。

わが国の原子力施設は、核不拡散条約（NPT）に基づき、国際原子力機関（IAEA）の保障措置が適用され、核物質は国際的に管理される（図表-5.4）。IAEAの保障措置の基本は、各原子力施設ごとに核物質計量管理を行うことである。これは施設へ出入りする核物質量をその都度正確に測定するとともに、施設内の核物質在庫量を適時に把握し、核物質の収支を確認することである。

・保障措置と核物質防護の技術開発

動燃事業団はこのような保障措置の信頼性向上のための技術開発に力を注いでいる。具体的には、核物質をその場で迅速に検査・確認するための非破壊測定機器の開発や核物質が正しく使用されていることを確認するための封じ込めや監視技術の開発などがある。

また核物質防護は、核物質を盗み出したり、核物質を取り扱っている施設を破壊するのを未然に防ぐのを目的にしている。そのために施設の区域設定、出入り管理、区域の監視、核物質の管理を行う。このためには異常の早期発見、早期通報装置やカメラ、センサー機器などの開発が進められている。

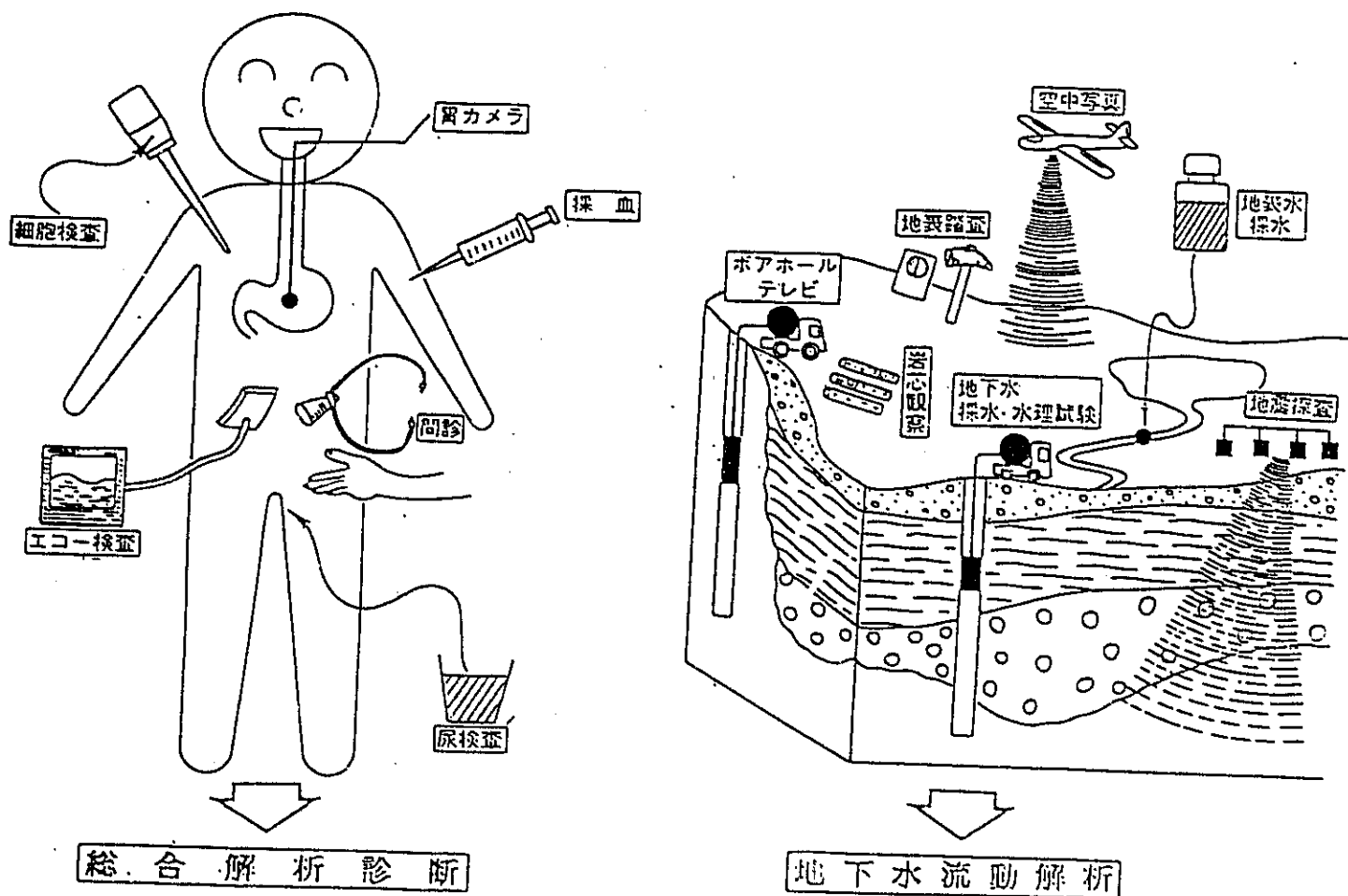


(図表-5.4)

5-3 地下の地盤特定の推定

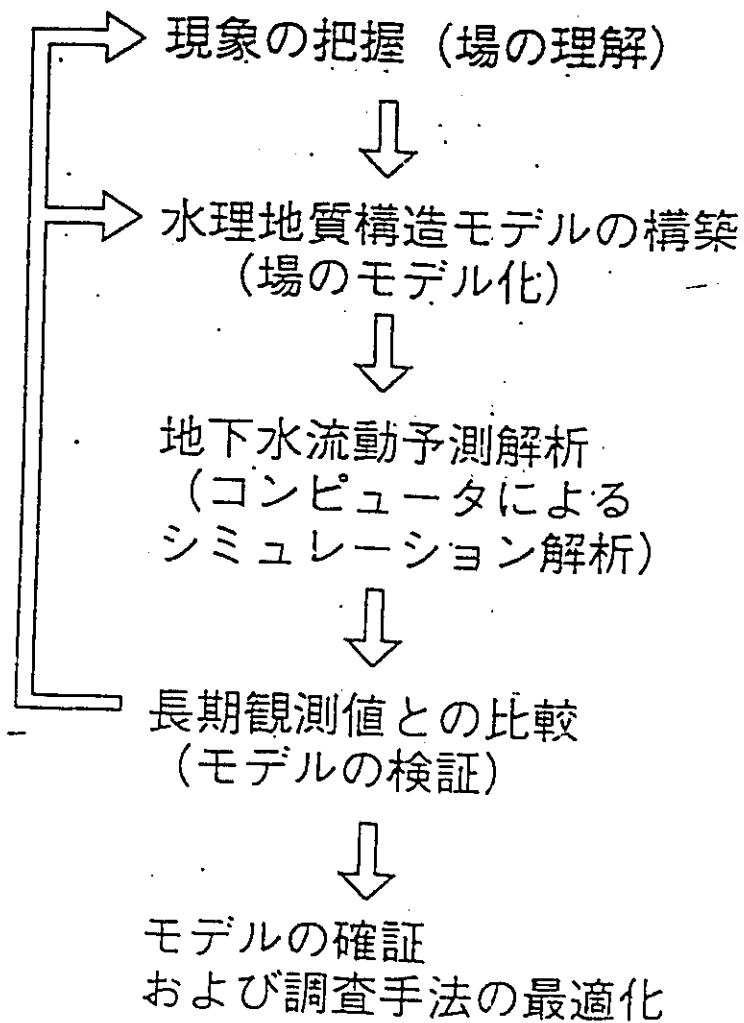
・広域地下水流動調査研究への利用

動燃事業団では深層を含む広域地下水流動の調査研究を進めている。これは地表から地下深部までの水理学的な環境を調査する技術と評価手法の確立を目的としている。地下水流動解析はちょうど人間の体を総合診断するように調査する（図表-5.6）。その評価アプローチは現象の把握から始まり、モデルの構築、予測解析、検証というサイクルを進める（図表-5.7）。これまでの研究調査の成果として、試錐工法・水理試験法・レーダー法・地下水採水法などの調査手法を開発し、その現場適応性を確認した。



(図表-5.6)

地下水流動特性評価アプローチ



(図表 - 5. 7)

5-4 原子力におけるコンピューター利用の特色と他分野での利用可能性

・セキュリティーの重視、豊富な現場のニーズ

コンピューター利用の世界ではメーカーが利用方法を提案して提供する時代は終わりユーザー主導でシステムを作る時代になっている。特に最近言われている情報処理の日米格差は主に両国のユーザーのレベルの差と指摘されている。日本のレベルを上げるためには高度の情報処理システムを構築しているところやそのようなシステムを必要としているユーザーに注目していく必要がある。この意味で原子力は現場に豊富なニーズがあり期待できる分野といえる。

原子力の情報処理システムの一つの特徴として核物質防護の観点からセキュリティーを重視している点がある。この技術、方法を蓄積すれば、一般のコンピューターシステムの機密保護システム開発にも役立とみられる。また安全性を重視した技術開発も特徴でその面でのシステム開発の成果も利用できる可能性がある。

・開発成果を汎用的に利用するには

現場で使う情報システムを開発しても、そのままでは他分野で広く使えるソフトウェアができるわけではない。現場のニーズに密着して開発したソフトウェアを巧みに一般化、コンセプト化する努力が必要になる。担当者が情報処理学会などで発表することで情報を発信する習慣をつけることなどを考慮してはどうか。またニーズの豊富なソフトウェアの開発現場に情報処理の専門家を配置すれば、ソフトウェアの汎用化が進み易くなるだろう。将来は豊富にある原子力の情報処理システムを整理、汎用化して世界に向けて発信できるようなソフトウェアができるようにすべきではないだろうか。

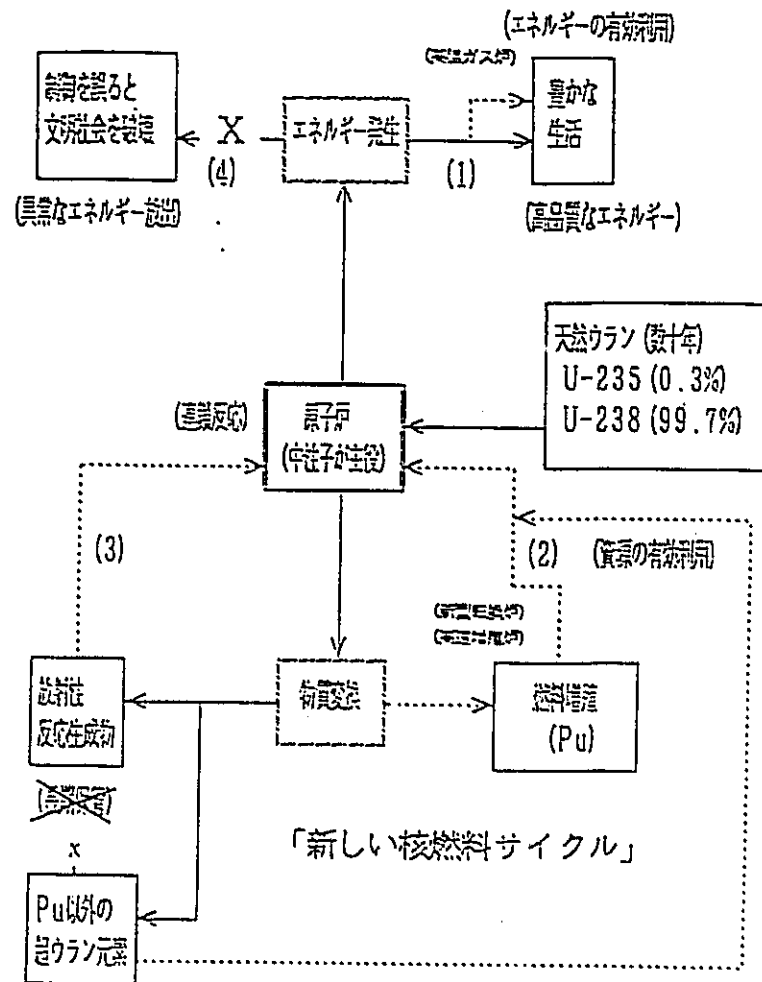
6. 文化として見た原子力技術

6-1 文化として見た原子力技術

・歴史から見た原子力思想の見直しの必要性

日本の原子力は原子力基本法並びに原子力開発長期計画に基づいて推進されてきている。欧米から学習し、軽水炉を導入してきた段階を経て、現在は欧米レベルに追いつき、むしろ日本が自主開発段階に入っている。軽水炉の時代は原子力の「光」（高品位のエネルギーを生み出すことによる豊かな生活）と「影」（操作を誤ると、異常なエネルギー放出により、文明を破壊する）が明確だった。高速増殖炉といった新型炉の時代に入ると、中性子という資源が有効活用され、「影」だった部分が「光」に入ってくる。21世紀に向けた新時代を考えると、さらに「影」の部分を「光」に取り込めるようになる。こうした新時代に向けて、新しい原子力思想を求められているのではないか。

21世紀に向けての原子力



自ら整合性を有する原子力システム

・自然や人間社会との関わりまで含む原子力研究の提案

現在の原子力研究はエネルギー工学の側面に片寄りすぎている。広く科学として、あるいは文化としての側面にも注意する必要があると思われる。エネルギー工学を中心としながらも、安全性を確保するシステム構築を考えるには、人間工学や心理学など社会科学の領域にも踏み込まざるをえない。生活や文化の視点も必要になっている。また、量子工学や粒子工学の方向をさらに先まで見ると、自然や生命を採求する生命工学の領域に入る。また、エネルギーやマテリアルといった面を突き詰めると、環境問題に行き着く。エネルギーを出せばいいんだという発想ではなく、「人の顔をしたやさしい原子力」の発想を取り入れるのがいいのではないか。

6-2 原子力文化の特色と一般化の可能性

・長期計画予算の制約と閉鎖性

原子力産業及び研究は原子力開発長期計画に基づいて進められてきた面が強い。予算が制約されるためだ。その長期計画はエネルギーを確保することを目標に立てられており、実用化技術の研究に重点が置かれる性格を持っている。日本原子力研究所や動燃事業団では初期に理学部出身者が多かったが、施設を作る段階になると電気や機械工学出身者が多くなった。工学でも基礎研究よりの分野と実用化に近い分野があり一概には言えないが、実用化技術の研究に片寄りはあるようだ。こうした人材の片寄りのせいばかりではなく、核物質防護上などの機密が多いためなどもあって、原子力の世界は他の世界を受け入れない性格を持つようになっていく。原子力ではすばらしいプログラムを作るが、汎用性がなく、磨けば光るのに磨かずに転がっている例も数多くある。原子力がエネルギーである以上、計画を作り実行していく姿勢は大切だが、もっと他の分野との交流を活発にすべきだろう。

・新しい研究文化を作る方法論

新しい研究文化は理学、工学といわず、社会科学なども含め広く人材の交流があることが望ましい。原子力関係の予算は相当なものがあり、使い方ですそ野は広がるとみられる。例えば、核反応や放射線、安全といった分野でも人体との関連や素粒子工学との交流は十分に可能だ。また、保守的にならないように新しい研究の芽出しをした人の評価もきちんとしていく必要がある。新しい文化は若い人が作るケースが多いが、抑え込まないようにするためにも、視点の違う目を他分野から持ってくる必要がある。

7 原子力技術と周辺技術の交流の可能性

7-1 原子力技術の特色

原子力分野における研究開発の最大の特色は、国が国家事業として計画し、国の管轄のもとで進むという点である。勿論、大学の原子力工学科など一部では、研究者の自主性が尊重される局面もあるが、特に大量の資金を要する研究開発では国の影響力が大きい。具体的には、原子力委員会が約5年ごとに見直す「原子力開発利用長期計画」が基本計画となり、これに基づいて具体的な研究開発計画が立案される。従って、主要な研究開発がプロジェクトという形をとり、ほとんどの場合、日本のエネルギー政策という立場から目標が設定される。

この方式は、国民や関係企業に対し明確なビジョンを与え、しかも日本のエネルギー供給計画と整合性をとるという意味では大いに合理性がある。国の予算は単年度主義であり、一定の期間にわたる継続性が必要な研究開発と、その性格において相い入れないものがある。長期計画を策定し、これに基づいて進めるという方式は、単年度予算と研究開発の関係を円滑にするという大きな役割がある。また、国の予算を投入するという視点からも、重複などを避けることができ、効率的な研究開発ができるという見かけ上のメリットがある。長期計画の策定段階では多分野にわたる関係者の意見を積み上げるというプロセスを経るため、利害関係者間での一応の合意ができ、個別的な局面での利害の対立などを軽減する効果もある。

このような利点の多い方式ではあるが、これによる弊害がないわけではない。研究開発の目標がどうしてもエネルギー偏重となり、目標を限定されることから自由な発想が限定される恐れがある。さらに、計画を策定すること自体が、計画外の問題を排除する作用があることには注意を要する。この排除作用は、社会全体として試行錯誤を否定するものであり、下手をすると若い挑戦的な技術者の意欲を殺すことにもなりかねない。

原子力といえども、基礎的で広範な研究の積み重ねを前提に技術体系が構築されるはずである。その意味からいうと、プロジェクトをブレークダウンした要素技術の研究開発だけでは質的な展開に限界がある。自由な発想の基礎研究を進める必要があるが、プロジェクト志向が基礎研究を阻害する面があることに注意しておく必要がある。研究成果の評価という面でも、プロジェクト志向が原因となり、合目的な評価がなされ易い。このため、現実の問題としても、新しい発想で研究の芽が出ても、これを継続的に支援することができず、火が消えてしまうケースも少なくないという。

このような問題は、研究開発の歴史が重なるにつれ、徐々に蓄積されていく。発想が研究開発の原点で無ければならないはずだが、予算配分が研究開発の出発点となっている弊害も表面化している可能性もある。

原子力の研究開発につきまとう大きな問題の第2は機密保持の問題である。この点での最初の問題は、核物質防護や核不拡散という問題が常につきまとうことであ

る。原子力の出発点が軍事技術であったという不幸な生い立ちが原因であるが、国際的な条約でも、国内の規制でも、この問題が原子力の技術開発に常につきまとっている。

類似の問題は各地で頻発する立地をめぐる裁判の作用である。原子力施設の周辺では立地の是非や安全性をめぐる裁判が行われる。公表された研究開発に基づく様々な知見は、直ちに裁判の材料に使われる可能性を持っている。従って、発表する側はどうしても、裁判に悪影響を与えないよう慎重にならざるを得ない。この問題も原子力の研究開発に様々な影を投げかけている。

技術は同分野、他分野の研究者が情報を交換し合うことで進歩するが、核物質防護、核不拡散という意識や裁判が情報交換の阻害要因になっていることは否めない。このことは原子力技術と他の技術の間に大きな壁を作ることになり、原子力の技術開発を孤立させる効果となって現れている。孤立した生物相が特殊な進化をするように、この壁が原子力技術の特殊化につながっている可能性がある。

原子力技術の第3の特色は安全に関連した厳しい規制下にあるという点である。この問題にも2つの側面がある。日本の場合、安全に関する社会的要求は諸外国と比較にならないほど厳しい。また、地震の多発地帯でもある。このため、原子力分野で開発される技術は、重装備になりすぎるきらいもある。このことはコストの面に直接影響を与えてしまう。安全の要求に対し誠実に応えることは原子力の前提条件でもあり、それを否定することはできない。しかし、他分野との関係を考えるとき、コスト意識の希薄さは、原子力技術の特殊性を加速することになっている点も見逃すことはできない。

もう一つの安全性からくる問題は放射線防護である。放射性物質、もしくは法律的に放射性と考えられる物質については厳しい国内規制を受けている。特に、材料面で原子力技術の移転を考える場合、この規制が大きな障害になる可能性が強い。人々を放射線から守るという考え方も、欠かすことのできない問題であり、これと技術の相互交流をどう考えるかは、今後の大きな課題である。

7-2 交流の阻害要因

7-1で述べた原子力技術の特色は、そのまま様々な形で原子力技術が他分野と交流することの障害となり得る問題である。ここでは、これらの問題をもう少し具体的かつブレークダウンした形で検討する。

障害要因の第1は原子力の技術開発で合目的性が強調されることからくる問題である。今回の検討委員会を通して指摘されたことは、この世界で開発された技術をもう少し一般性を持たせることができれば、他分野でも十分通用するという点である。言ってみれば、磨けば光る玉なのに、磨かれていないために埋もれてしまうという指摘である。

この指摘には2つの側面がある。1つは、技術としての汎用性の欠如である。例えば、ある目的で開発されたコンピューターのプログラムを考えてみよう。開発されたそのままの形では、ユーザーとのインタフェースに対する配慮が十分でなく、特殊な操作をしないと使えない場合が多い。処理するデータなども目的の為に必要な分しか準備されていないし、例外処理の用意も十分でない。しかも、使う場合のマニュアルも整備されていない。

これでは、このプログラムを市販し、広く普及させようとしても無理である。広く使われるためには、これらを改善し一般的に使える形にしなければならない。原子力の研究では、合目的性が意識される余りか、広く使われるためのもう一步の努力が欠けていることが多い。これは、他分野と技術交流するに当たって大きな障害になっている。

材料技術を考えた場合、原子力という目的だけであれば、ある温度範囲、ある応力の範囲で使えばいいという立場から、その範囲での物性だけを研究することになる。その範囲で材料を使う例が他にあればいいが、ほとんどの場合が違った環境で使われる。研究を少し広げて、広い温度範囲などでの物性データを蓄積しておけば、そのデータは広く活用することができる。本報告書で詳細に検討している深地下での水の挙動解析に関するコンピューターシミュレーションでも、一般的に使える形までパッケージ化がなされれば、応用範囲は広がるであろう。

合目的性から生じる第2の問題は、科学としての取り組み不足である。ある現象を見つけたとき、なぜその現象が起きるかの科学が確立すれば、その知見は広く活用することができる。中性子が材料に与える悪影響を避けるための研究を考えてみる。使える材料を探すだけの意味なら、材料に中性子を当ててみて、影響の少ない材料を経験的に選択すれば済む。しかし、これだけでは、材料が中性子を吸収した場合に何が起こるのか明確にはならず、他の分野でこの現象を利用することはできない。

原子力の世界では、企業における研究開発でも往々に見られるが、成果を急ぐあまり、経験的な知見だけで満足する状況があるようにも見受けられる。この点も他

分野との交流という意味では、障害要因になっている。

第2の障害要因は機密に対する要求からくる壁の問題である。自ら壁を作れば他分野との技術交流がうまく行かないのは当然である。原子力技術に機密が必要か否かは議論のあるところではあるが、現行の国際条約などを考えれば、機密を要する部分があることは認めざるをえない。

機密を要する情報と不要な情報を切り分けるのは意外に難しい。もっとも安易なやり方は、機密の必要性を拡大解釈することで機密領域を増やす解決法である。特に、機密漏洩などで責任が追求されるような状況であれば、安易な解決法は際限なく広がってしまう。特に、裁判などを抱えていると言う状況であれば、情報の公開を恐れる気持ちは強くなる。技術開発だけでなく、原子力の全般にわたってこの傾向がないとは言いきれない。現実には、この機密の壁が技術交流の大きな障害になっていると考えることができる。

安全に関する法的な規制は、材料や医療応用などとの技術交流に大きな障害となっているが、この問題は技術交流という視点だけから議論を進めるのは困難である。その意味で、本報告書では具体的な可能性を示す(7-4参照)にとどめる。

最後の問題は、原子力の技術開発と他分野の技術開発では技術者が共有している文化が違うのではないかと言う点である。人間の世界でもそうだが、文化に大きな差がある場合には交流は困難になる。原子力技術と他分野の交流が発展しない理由にこの文化の差もあると考えられる。

7-3 潜在的交流の可能性

7-2 で述べたような阻害要因を克服できれば、原子力技術は他の分野へ波及、他の分野との共鳴・協力を実現する広い可能性を秘めている。さらに、これらのプロセスを通して、他分野の技術によって原子力技術そのものが刺激を受け、いっそう発展する可能性も高い。その潜在的な可能性のある分野を示すと、以下の図のような分野を考えることができる。

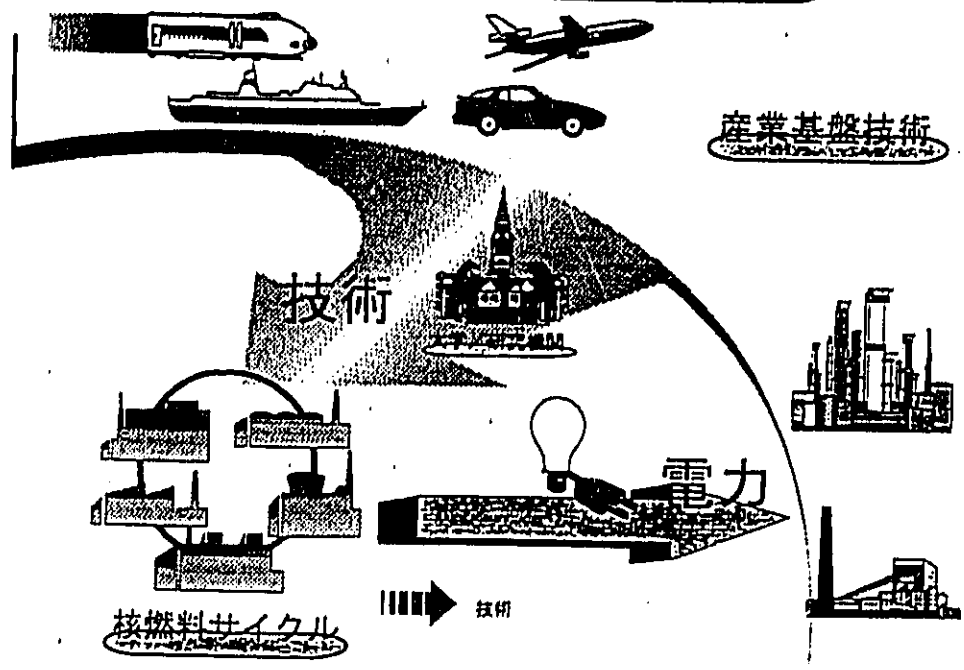
調査検討にあたって

- 既往産業から核燃料サイクルの技術
- 核燃料サイクル技術の基盤
- 核燃料サイクル技術の次世代バージョンの例
- 境界領域の技術の概念 (例)
- 核燃料サイクルからの発展
- 境界領域の開発技術の抽出

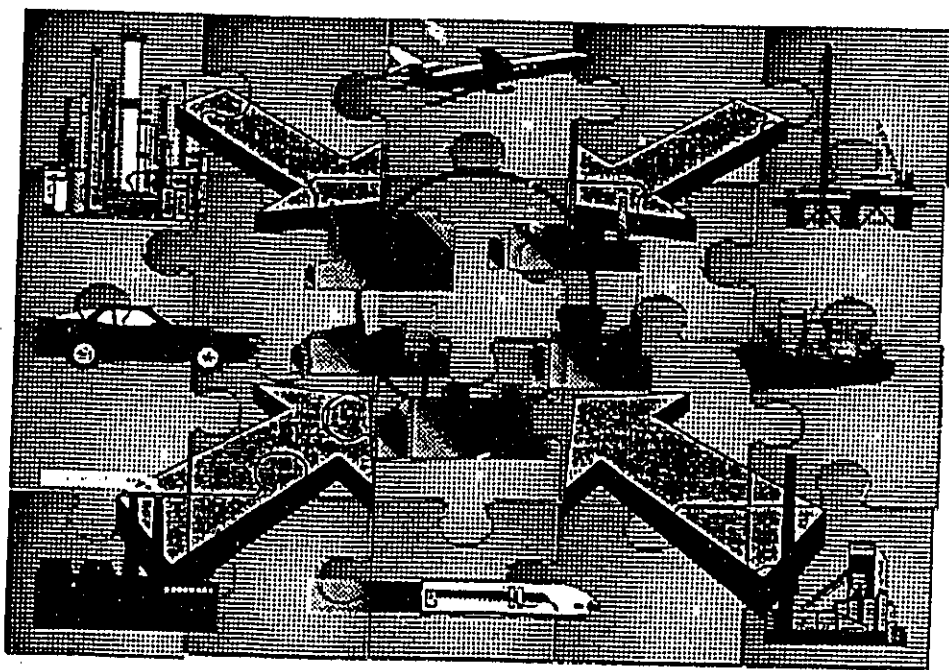
核燃料サイクル技術の汎用性？

- レーザー技術
- 遠隔操作技術
- 隔離・遮蔽技術
- ロボット技術
- 搬送技術
- 高温利用技術

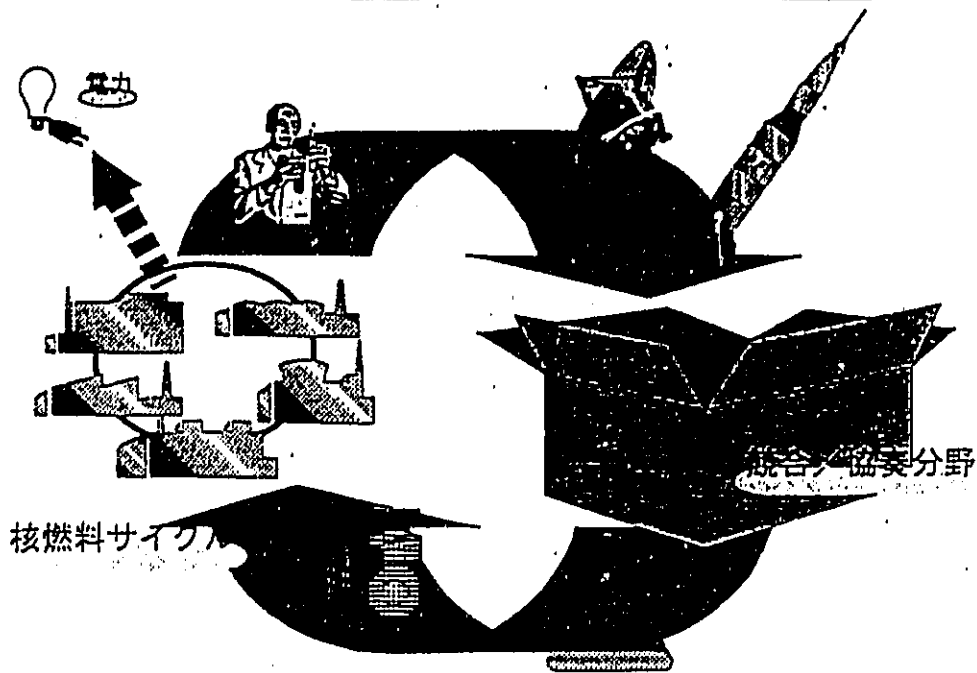
既往産業から核燃料サイクルの技術



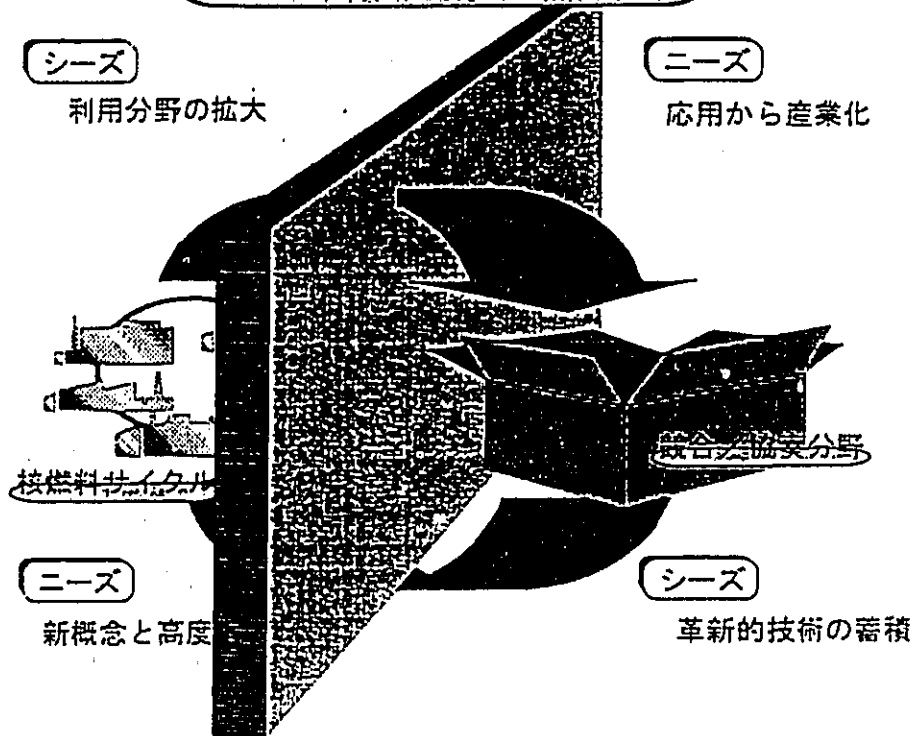
核燃料サイクル技術の基盤



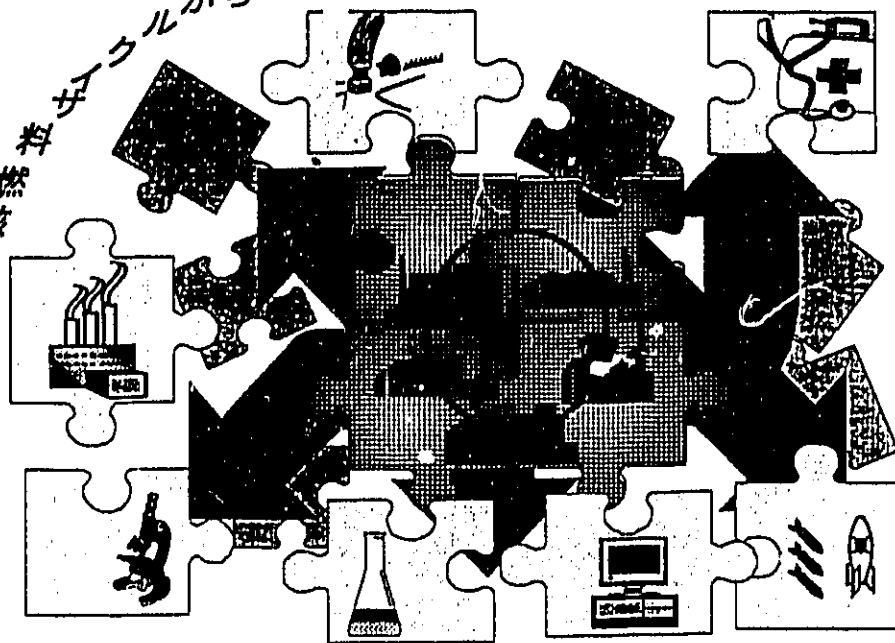
核燃料サイクル技術の次世代バージョンの例



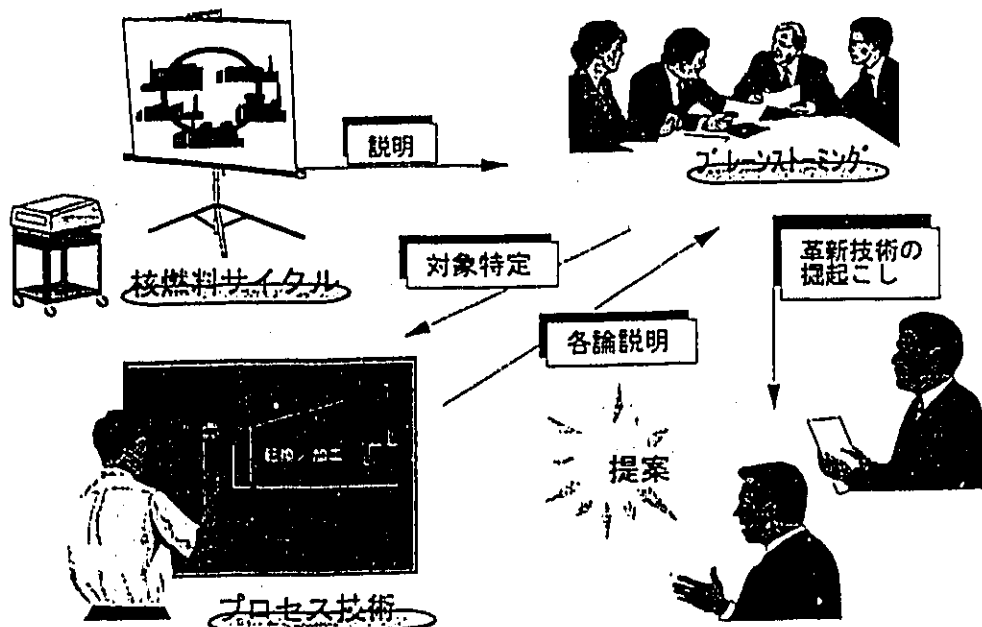
境界領域の技術の概念 (例)



燃料サイクルからの発展

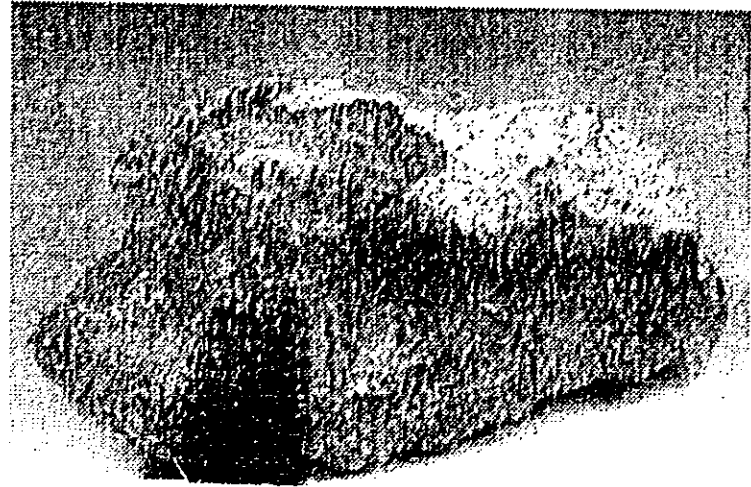


境界領域の開発技術の抽出

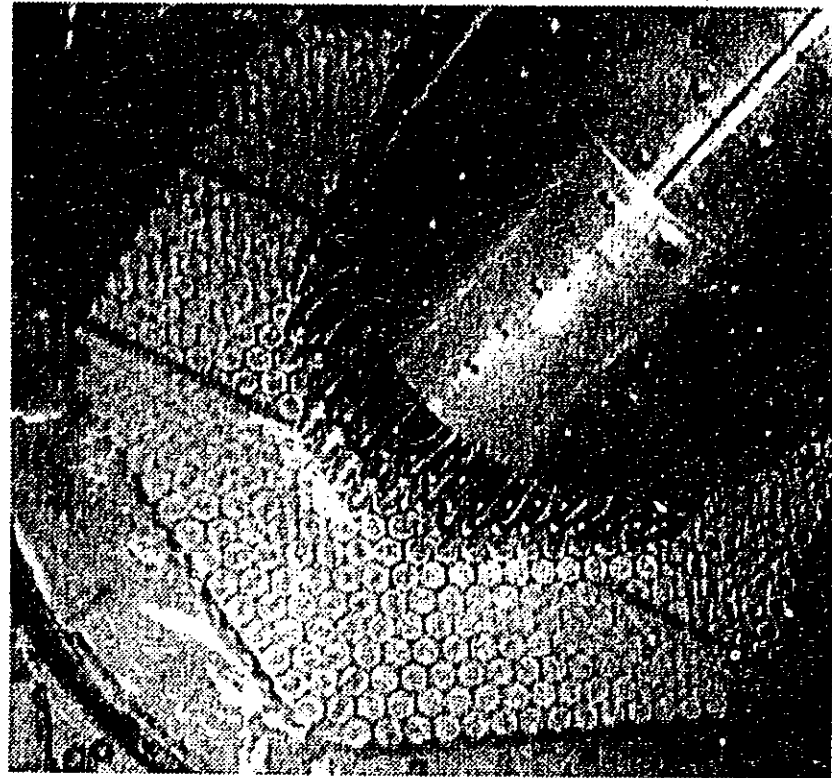
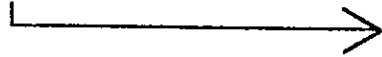


核燃料サイクル技術の汎用性？

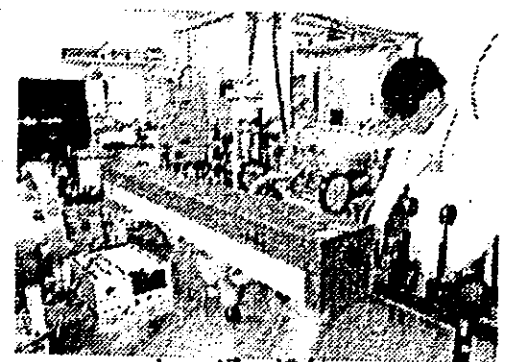
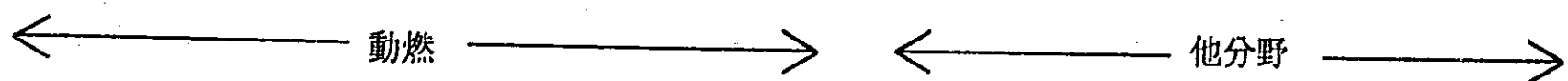
39



燃焼済み燃料棒から発電炉



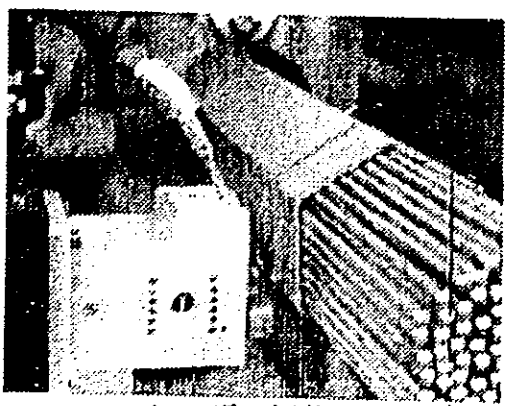
レーザー技術



レーザー濃縮

ウラン濃縮

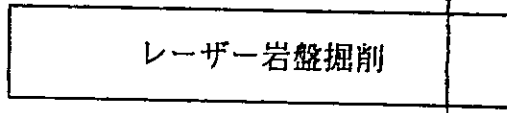
化学反応
素材化
成分分離/単離



レーザー解体

再処理
施設解体
廃棄物処理

金属加工
解体

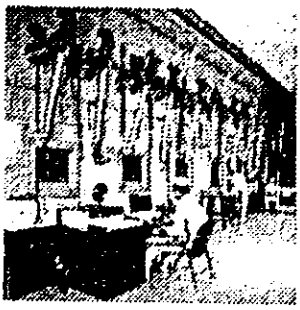
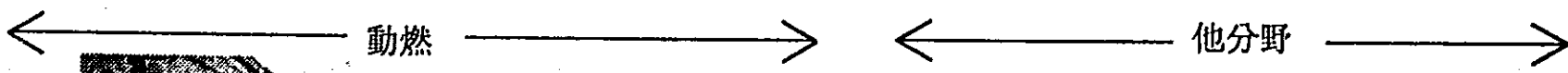


レーザー岩盤掘削

先導的技術開発
(廃棄物処分関連)

非金属解体/ハ破碎

遠隔操作技術



セル内操作
(一般マニプレータ)

再処理

危険物ハンドリング
重量物ハンドリング
無菌操作

41



セル内操作
(両腕マニプレータ)

再処理

危険物ハンドリング
重量物ハンドリング
無菌操作
人工現実対応
 深海領域での運動
 宇宙空間での運動
 ナノマシニングへの適用

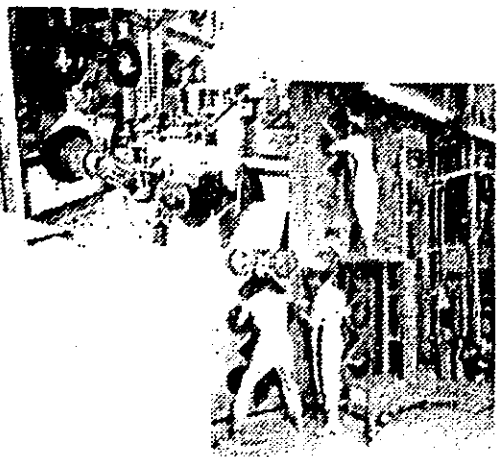
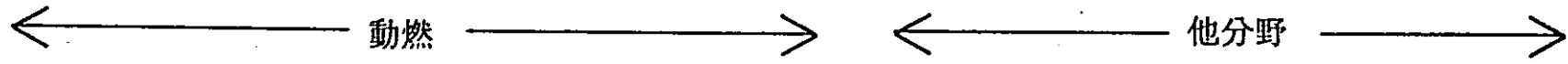


自動サンプリング

再処理

化学行程
血液管理
微生物管理

隔離・遮蔽技術



燃料製造
燃料加工

バイオテクノロジー
ナノマシニング
無菌室

危険物処理
未知物質処理

42

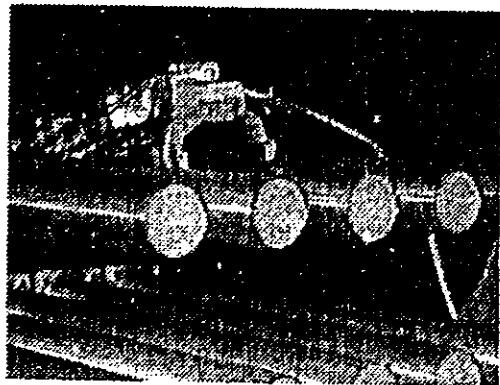
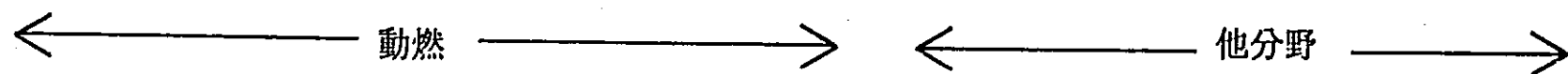


グローブボックス作業

再処理
照射後試験

精密機器管理
惑星工学

ロボット技術



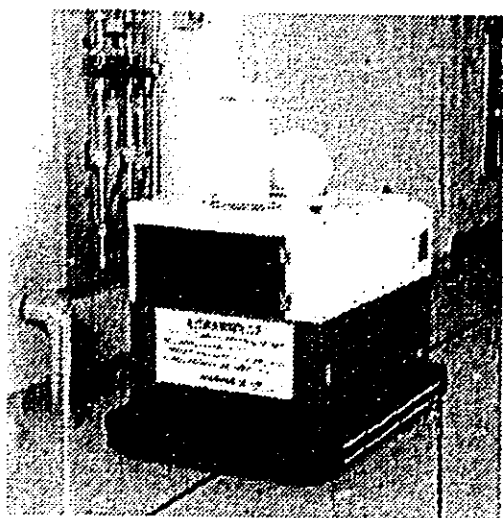
配管ロボット

再処理

極限環境ロボット
海洋
地底
宇宙

原子炉

特殊環境ロボット
高所
狭塞
高温/低温

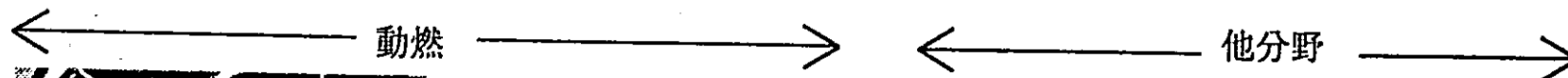


モニタリングロボット

安全管理

通常作業環境
適性環境制御
危険予知

搬送技術

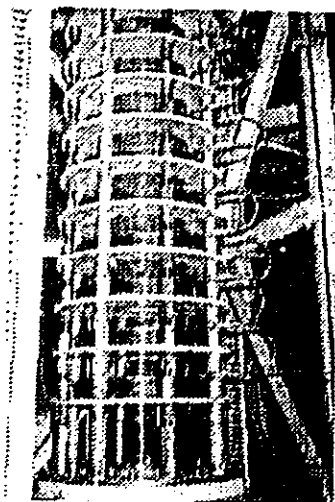


集合対搬送

燃料加工/組立
再処理

重量物搬送
貯蔵管理
危険物搬送

4.

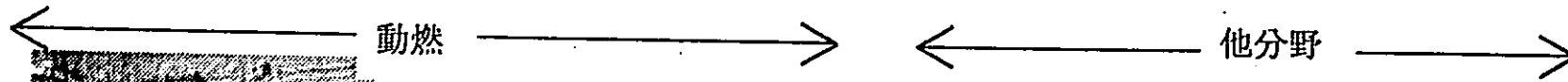


垂直搬送システム

先導的技術開発
(廃棄物処分)

高速/複数制御カーゴ
高層ビル物流システム
カタバルト
チューブトレイン

高温利用技術



プラズマ溶断

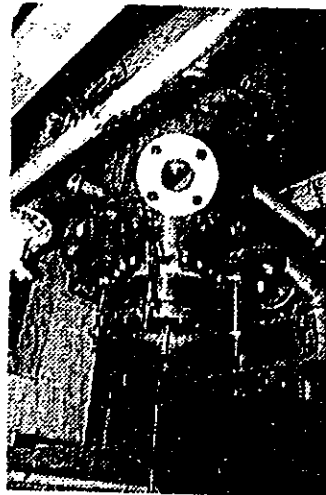
動燃

廃棄物処理

解体
減容

他分野

45



ガラス流下

廃棄物処理
(ガラス固化体加工)

高温材料
薄板加工
線材加工
特殊合金
セラミックス
超電導素材

7-4 技術交流の潜在可能分野としての医療と宇宙

交流の潜在可能分野として医療分野、特に放射性物質の医療での応用可能性、宇宙分野での応用可能性を取り上げてみた。

7-4-1 医療での応用

現在、医療機関にて使用している放射性核種を図①②(表①②参照)に示す。

密封線源として取り上げたCo-67、Cs-137や、Cf-252などはこれを患部のすぐ近く、または、直接当て、これによる放射線照射によって治療するという使い方をする。外照射に用いる密封線源は頻繁な交換を必要としないように長い半減期を持つ核種が好まれるが、そのために管理や取り扱いが繁雑となる嫌いもある。いずれの核種を選択するかは、発するエネルギーに基づいた線量率の高低で決める。実際には癌や患部の組織型等にも左右され、一定の法則はない。最近では、イリジウムや金などの小さい粒状に変形できる性質を利用し、食道癌、舌癌、子宮癌などの患部内部に埋め込んで治療する方法が開発され、Ir-192などの需要が高まりつつある。最近、頻繁に用いられる骨塩定量装置のエネルギー線源として用いられているAm-241、Gd-153なども医療機関で使用している密封線源の一つである。

非密封線源は体内に投与し、患部の部位や機能を診断する核医学検査(アイソトープ検査)に用いる核種と、投与して集積した部位を選択的に照射治療する内用療法に用いる核種の2つに分かれる。この他に、患者の血液や尿中に含まれる生体成分のアッセイに用いるI-125やP-32なども医療機関で使われており、前者の体内診断(In vivo検査)用核種に対して[in vitro検査]として区別している。後者は特に医療機関に限った使用ではないので、ここでは前者の核種についてのみ述べる。

核種を投与した後に体外からカメラ撮像を行う検査の場合は適当なエネルギーのγ線を発し、短いにこしたことはないが、患部に達する期間に見合うだけの長い半減期を有する核種を必要とする。アイソトープのエネルギーが高すぎると散乱が大きく、正確な画像を得ることができない。低いエネルギーの核種は投与量を多くしない限り、鮮明な画像を得ることは難しい。これらの条件を満たす核種としてTc-99mが最も優れており、結果的に現在の診断用カメラのほとんどがTc-99mに合わせたセッティングになっている。そこで、診断用の放射性医薬品のほとんどがTc-99m標識化合物に統一されるような傾向もあり、現在はもちろん、将来最も有用な核種と云っても過言ではない。この核種は半減期が短いため、医療機関ではジェネレーターを設置している場合も多い。Mo-99ジェネレーターの生産は現在カナダのみであり、需要に見合った供給源を必須としている。Fusion-Biproductの一つ、Mo-98やMo-99の再利用の有力候補の一つである。

Tl-201はエネルギーの点では優れた核医学診断用核種とはいえないが、カリウムに生理学的性質が酷似していることから、心筋血流の把握(心疾患の診断)に用いられている。心疾患の頻度、患者の数からしてTl-201は需要の多い核種の一つであり、最近では甲状腺腫瘍や脳腫瘍や肺癌への集積からこれらの局在診断にも用いら

れている。

ヨードはタンパク質や生体成分の標識に広く用いられており、標識方法も古くから確立している。さらに、ヨードイオンの生体内での動態も把握されているため医療で需要の多い元素となっている。I-125は半減期が長く、エネルギーも低く、また、オーグ電子を放出して生体内で細胞核を照射するため、日本では体内投与を認めていない。I-131は γ 線エネルギーが些か高すぎ、また、 β 線を発するため診断用核種としては適当でない(後述参照)。これらに比べ、I-123は半減期、エネルギーともにTc-99mと類似しており、診断用核種として適当である。I-123は純度の高い製品として精製供給されるようになり、需要は年々増加している。Sb-121からの生産を期待することができる。

Ga-67は癌や炎症の局在診断に用いている核種で、その生体内動態は選択性にやや欠けるが、これにかわる核種がない間は需要の減少しない核種でもある。Zn-66からの生産を期待することができる。

In-111はGa-67に類似した核種であり、血液成分やタンパク質の標識が確立されて以来、需要と生産が再考されている核種である。診断用核種の化学形態については特に問わないが、肺の機能などを検査する場合には吸入しやすい気体状の核種が好まれる。Kr-81mガスやXe-133ガスがその例である。Kr-99mは半減期が短いのでジェネレーターから直接患者に吸入させて使用する。血液成分の体内寿命を測定する場合は、Fe-59やCr-51で標識した赤血球を投与し、経時的に採血して血中放射能を測定する。これらのアイソトープは半減期が長く、エネルギーも高いのでこれらに代わる核種が模索されている。

治療用の核種として日本で認められているものはI-131のみである。I-131は選択的に甲状腺に集積するため、I-131の発する β 線照射で甲状腺腫瘍を治療する事ができる。生体内で脱ハロゲン化もおこるので、必ずしも最適な内用療法用の核種ではないが、高いエネルギーながらも γ 線を発して診断用としても用いる(治療前に集積を確認する)ことができるため、将来も需要の見込まれる核種である。Te-131やTe-130からの生産が可能である。

前述したように日本で内用療法用のアイソトープとして現在認められている核種はI-131のみである。非密封線源を治療に用いるに際してはそのアイソトープが体内投与後確実に患部に集積し、他の正常の部位には集積しない選択性を必要とする。また、不必要なアイソトープは速やかに体外に排泄されることが望ましい。最近のDrug-Delivery-Systemの研究でアイソトープを望む部位に運ぶことが可能になりつつある。これに伴い治療を目的とした核種の候補が数多くあがってきている。目的とした部位に運ぶ核種はその物理学的性質、化学的性質、生物学的性質、生成反応などを考慮して選択する。例えば、半減期が短すぎると目的とした部位に核種が到達する前に放射能がなくなり、治療として有効ではない。また、長すぎると線量分布が低く、結果的に多量の核種を投与することになる。崩壊の形式は細胞の核を直

接被曝するのであれば（細胞核近くまでアイソトープが運ばれるのであれば）オー
ジェ電子や低エネルギーの電子でも治療効果を期待できる。 α 崩壊はLETが高く、
細胞の直径程度の（40-80 μ m程度）飛程距離であるので、ミクロの転移巣などの治
療を期待できる。 β 崩壊は α 崩壊よりも飛程が長いので、容量の大きい疾患に適し
ている。高エネルギーの β 線は吸収ごとに線量が低下していくので小さな腫瘍の治
療には向かない。また、 γ 線は前述した体外からの画像診断には適しているが、全
身の被曝量も増すので、エネルギーは300keV以下が望ましい。以上のような条件を
満たすものとして表③にあげるような核種が次世代の候補となっている。

Cu-67は適当な γ 線も発するので、患部への集積を確認すると同時に治療計画を立て
ることのできる核種として有望視されている。Y-90やRe-186は先ず化学的性質の
似たIn-111やTc-99mで局在性を確認した後に投与する核種である。前述したように、
In-111やTc-99mは核医学検査で最も汎用されているので体内分布に関する情報が多
く、従って、Y-90やRe-186は治療として用いられる最優先の核種である。欧米諸国
では、Y-90をカプセルに封入して肝動脈内に置くことで、肝癌の治療に効果をあげ
つつある。

Sr-89はすでに欧米では骨転移巣の疼痛緩和用の放射性医薬品として市販されてい
る。Sm-153もEDTMPというキレート剤と結合させて投与し、骨への集積性を生かし、
骨転移巣の治療（疼痛の減少）を期待している。

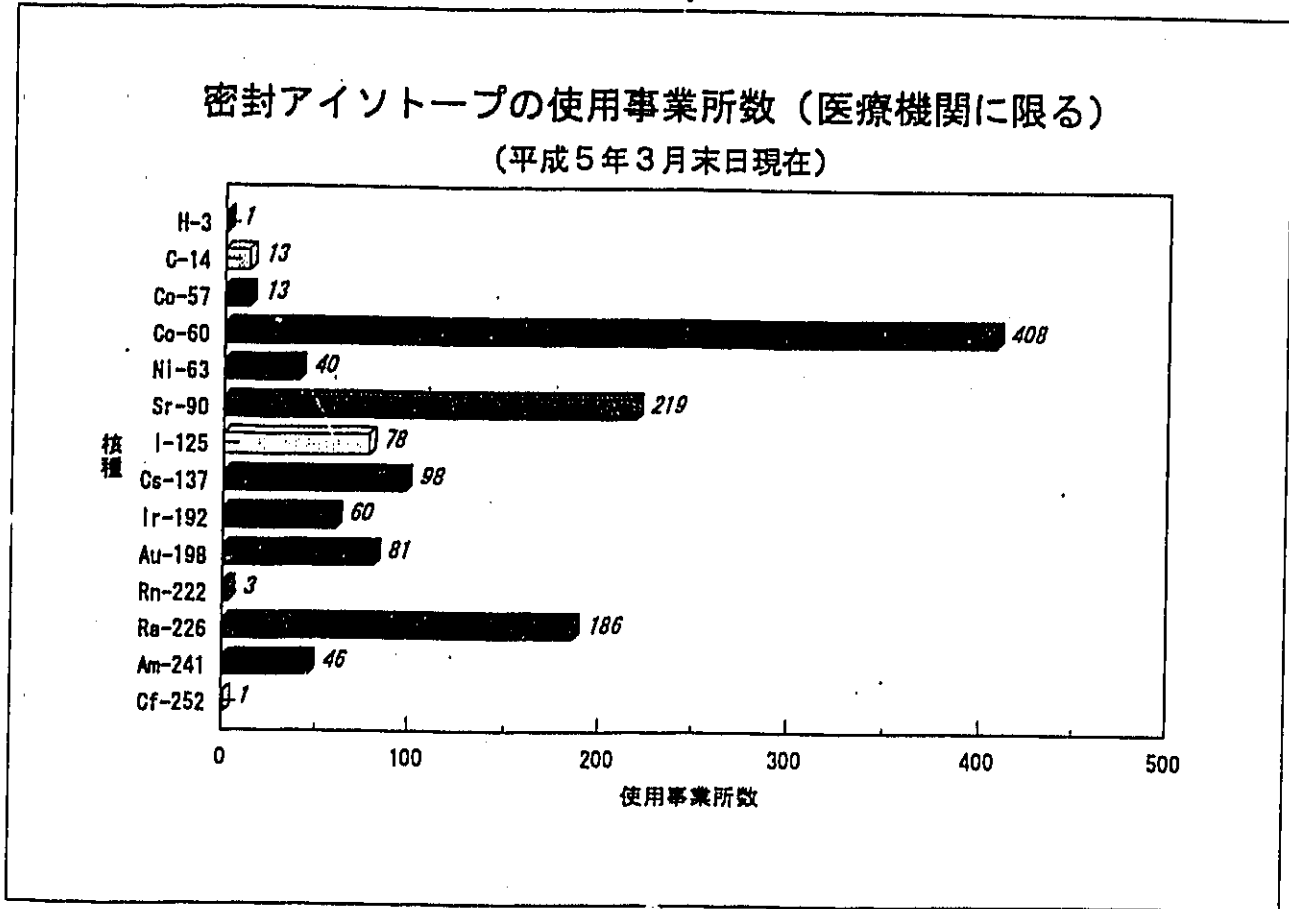
Pd-109、Pr-142、Gd-159は半減期が短いので、患部に早く到達させるDerivery-
Systemを必要とする。

Bi-212やAt-211などの α エミッターも候補の核種である。前者は親核種Pb-212を
先に投与して、生体内でBi-212へと崩壊することを期待している。Fm-255も半減期
が20.1時間で適当な α エミッターであるが、エネルギーが高すぎるため、Derivery
に用いる化合物の結合を切断する恐れがある。

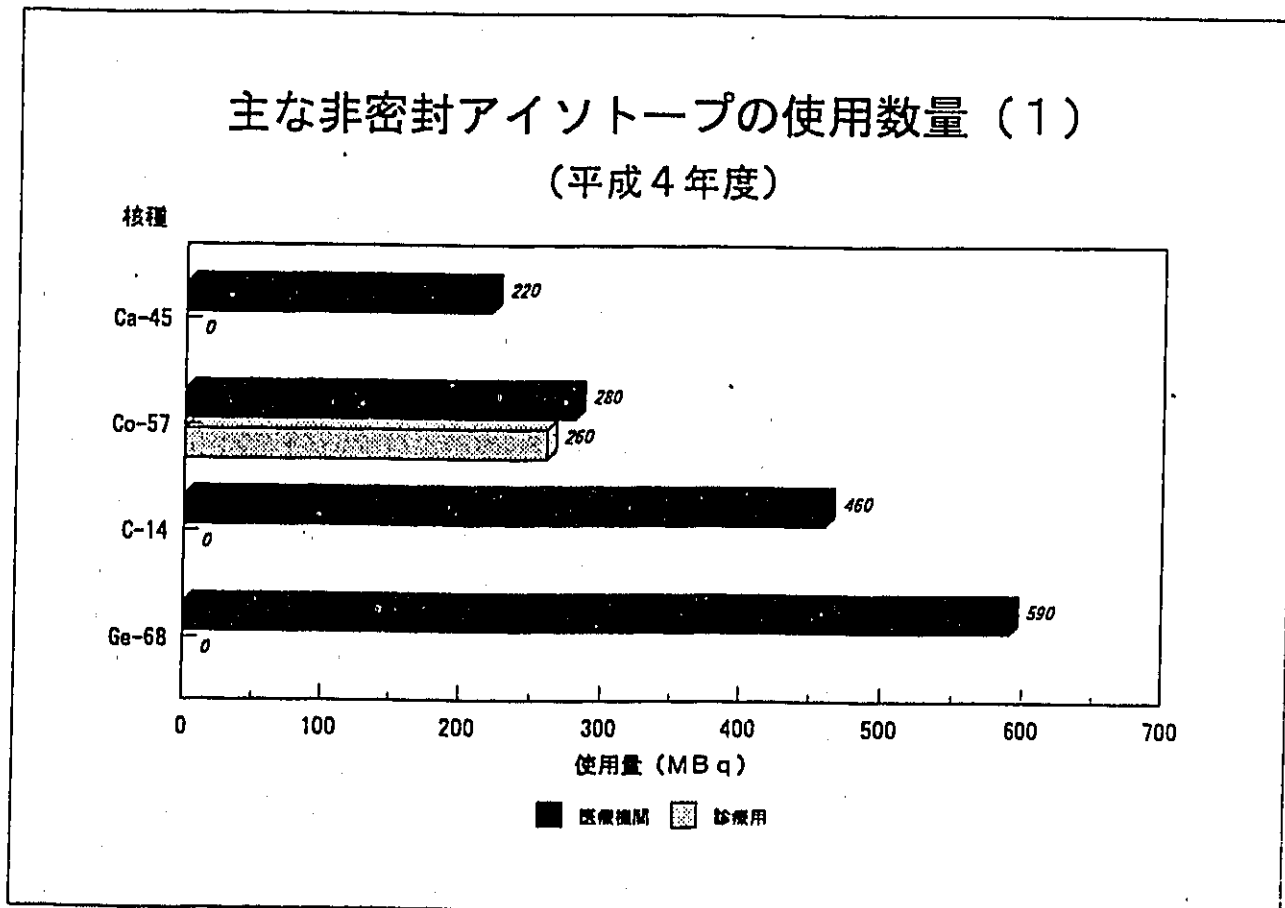
診断用の核種としての候補はそのほとんどが、PETの利用を考慮したものであ
る。従って、医療機関にその生成システムを設置することが前提となっている。但
し、Ga-68のように比較的半減期の長い核種は短距離間であれば、搬送が可能である。
Rb-82はTl-201に代わる心臓の血流製剤として期待されており、F-18とともに放射性
医薬品として既に使われつつある。また、ヨードについては前述したように非常に
多くの情報があるので、目的に沿って同位体を選択する。PETを意識した場合には
I-124が有用である。

これまでの本文と各表にはFusion-Biproductとしての可能性を示した。一般に治
療に用いるには1処置当り1.8GBqは必要としている。更に、その純度は90~100%で
あり、特に、不純物として含まれる核種に毒性や正常組織への被曝が考えられる場
合にはより高率の純度が要求される。例えば、Y-90を生成する上では混在する
Sr-90は体内投与量として2 μ Ci以下に抑えることが指示されている。ここにあげた
核種をFusion-Biproductから再利用できるか否かはこの精製過程にかかっていると
いっても過言ではない。

図①

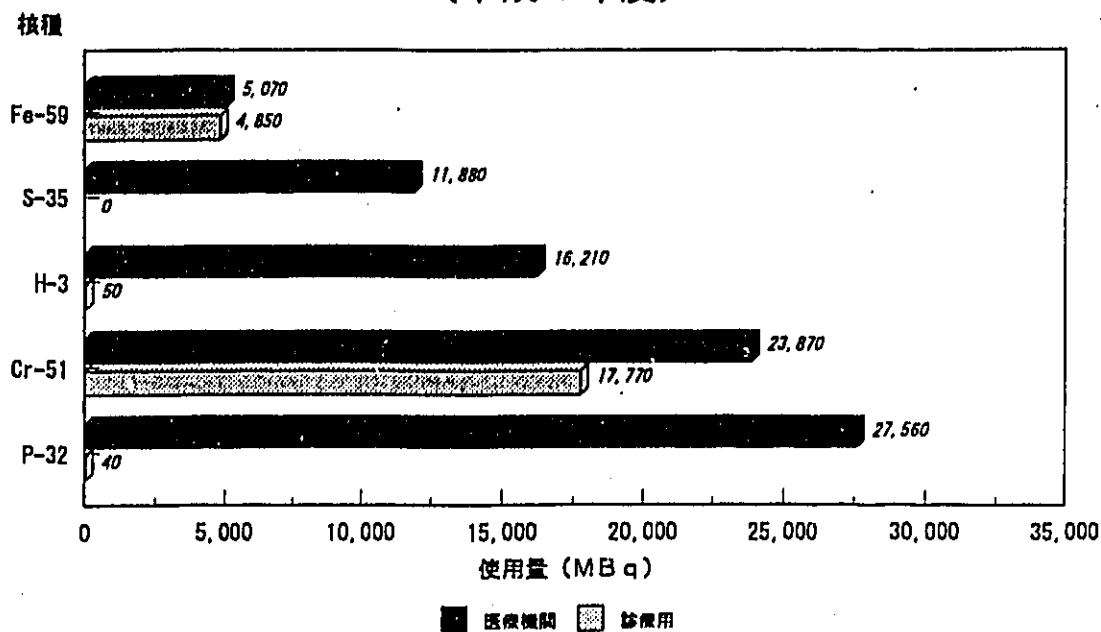


以下 図②



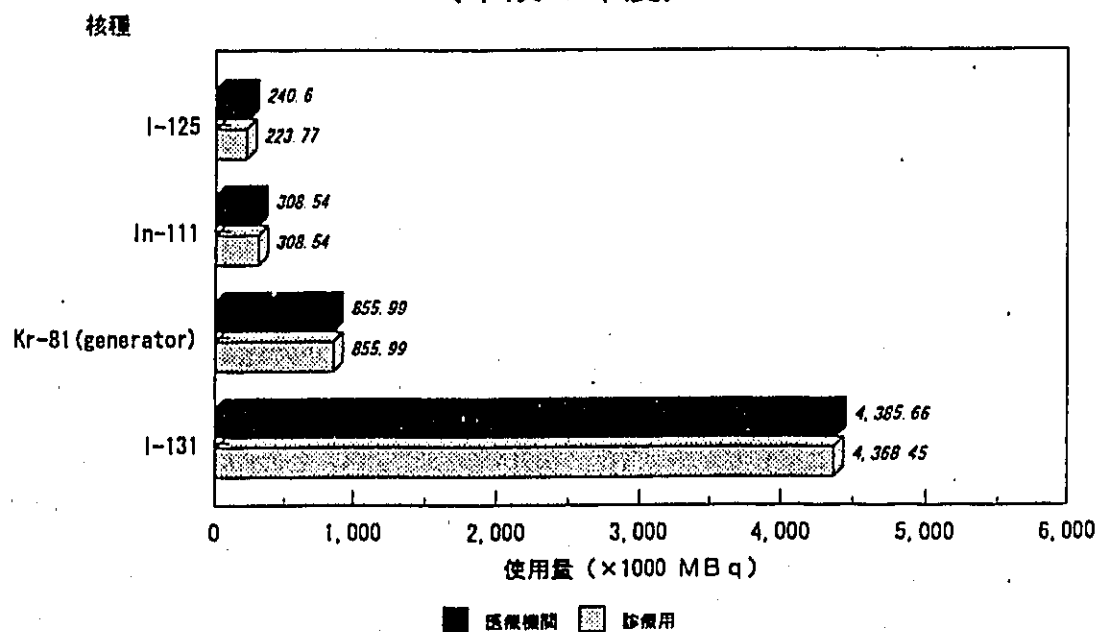
主な非密封アイソトープの使用数量 (2)

(平成4年度)

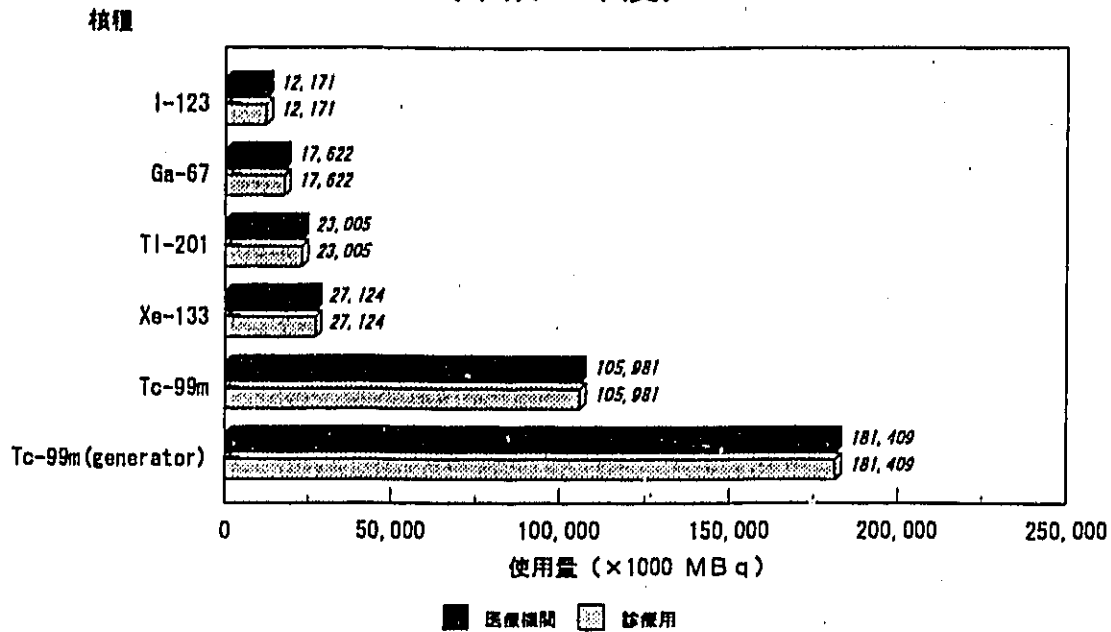


主な非密封アイソトープの使用数量 (3)

(平成4年度)

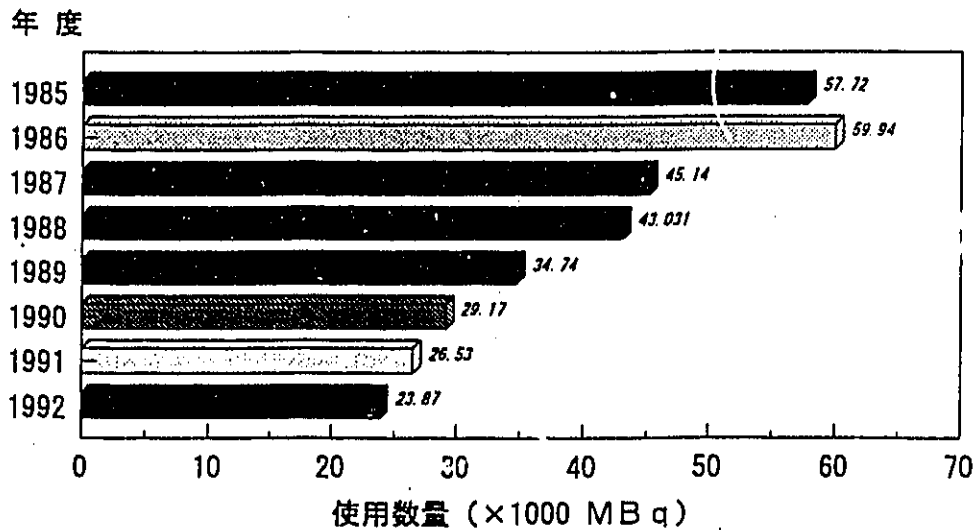


主な非密封アイソトープの使用数量 (4) (平成4年度)



主な非密封アイソトープの使用数量 (昭和60年度～平成4年度)

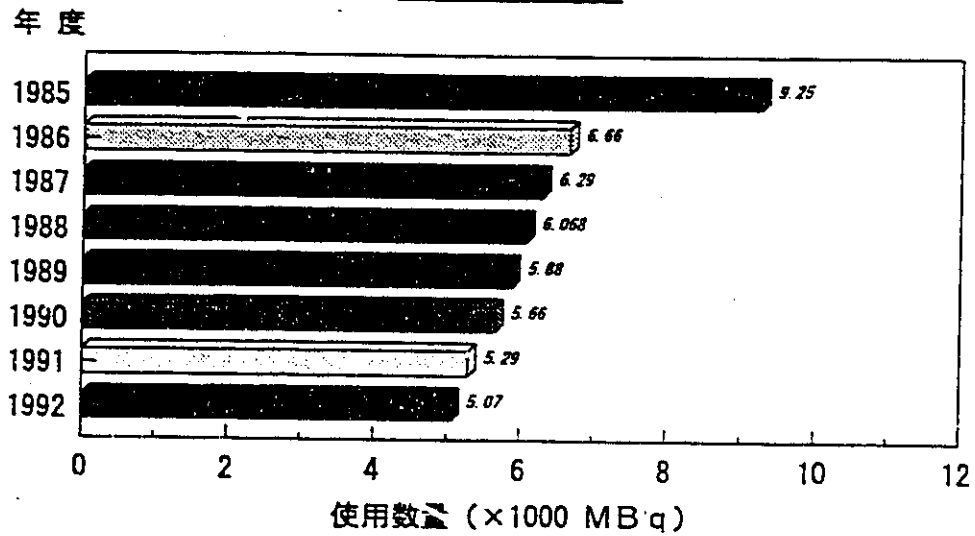
Cr-51



主な非密封アイソトープの使用数量

(昭和60年度～平成4年度)

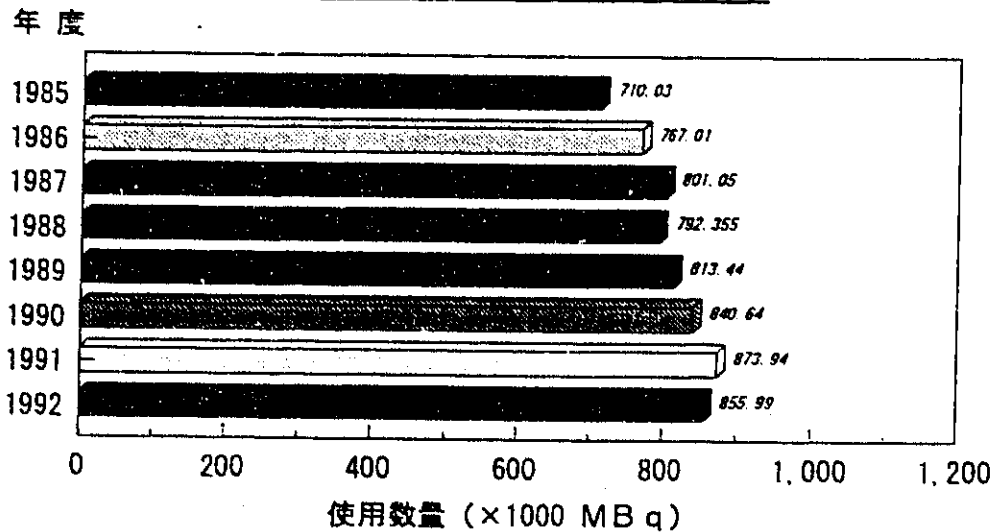
Fe-59



主な非密封アイソトープの使用数量

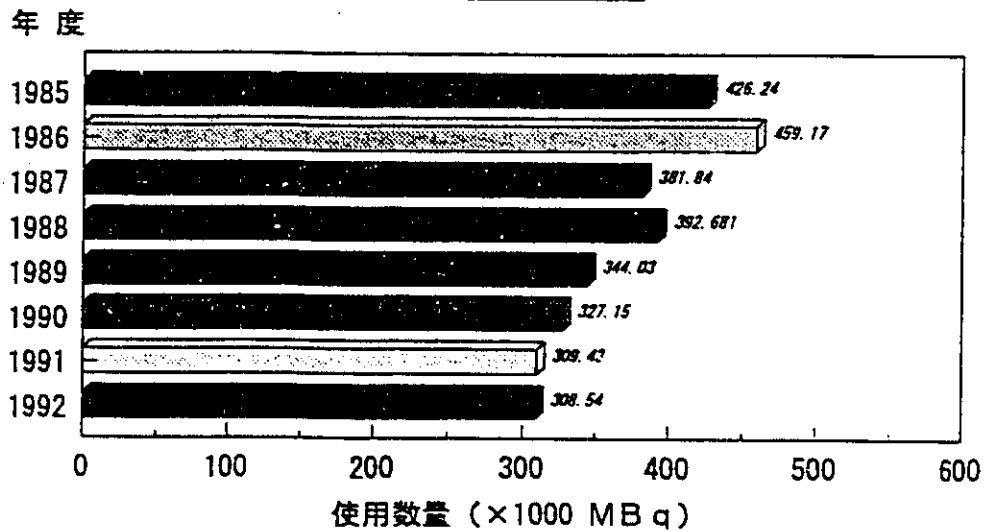
(昭和60年度～平成4年度)

Kr-99m (Generator)



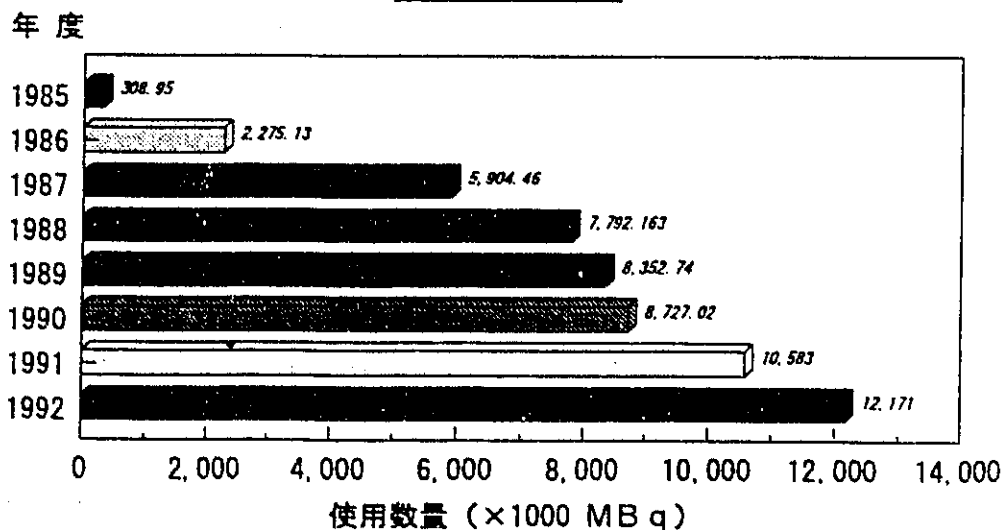
主な非密封アイソトープの使用数量
(昭和60年度～平成4年度)

1n-111



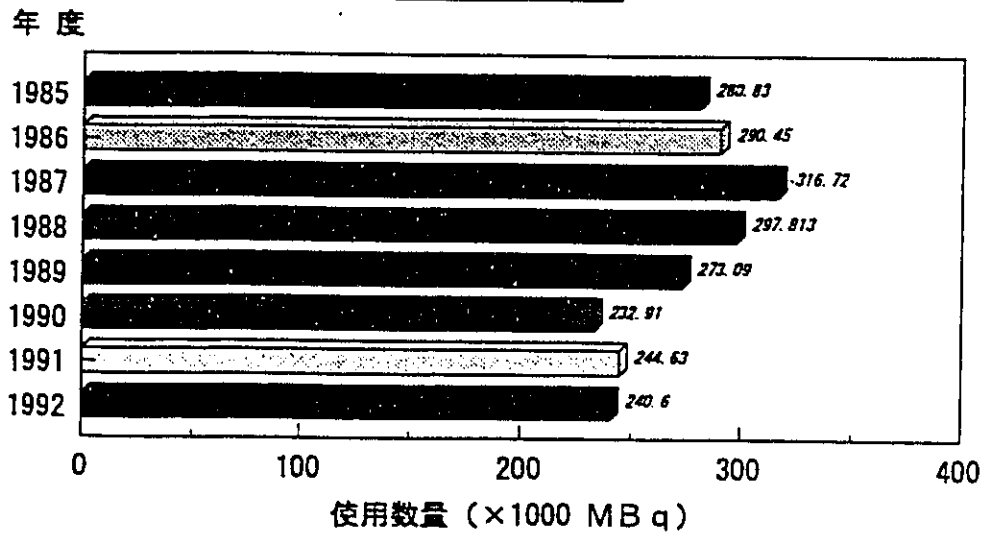
主な非密封アイソトープの使用数量
(昭和60年度～平成4年度)

1-123



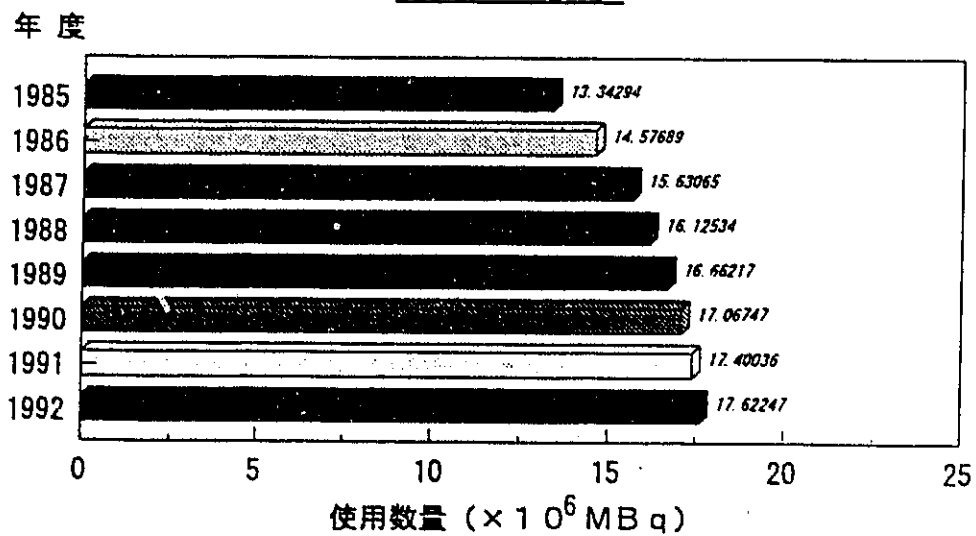
主な非密封アイソトープの使用数量
(昭和60年度～平成4年度)

I-125



主な非密封アイソトープの使用数量
(昭和60年度～平成4年度)

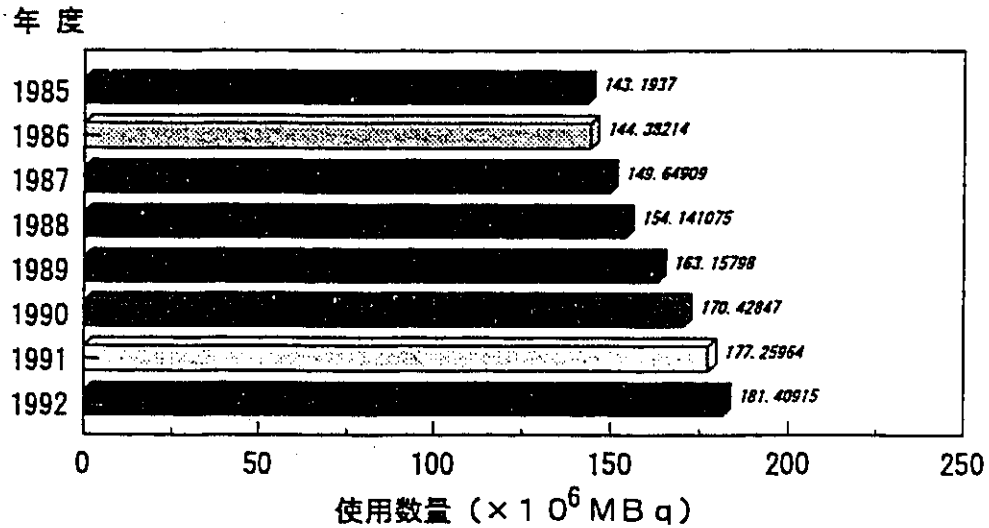
Ga-67



主な非密封アイソトープの使用数量

(昭和60年度～平成4年度)

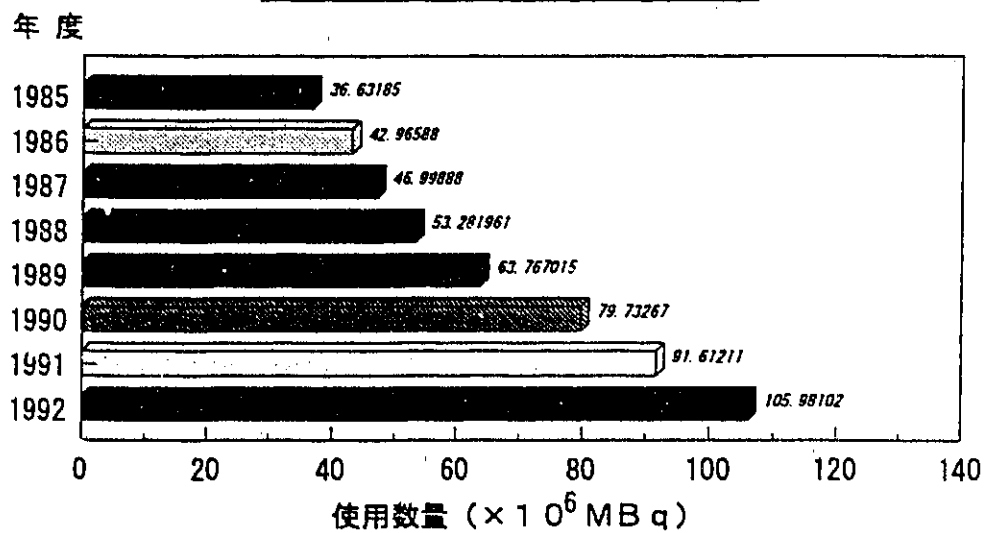
Tc-99m(Generator)



主な非密封アイソトープの使用数量

(昭和60年度～平成4年度)

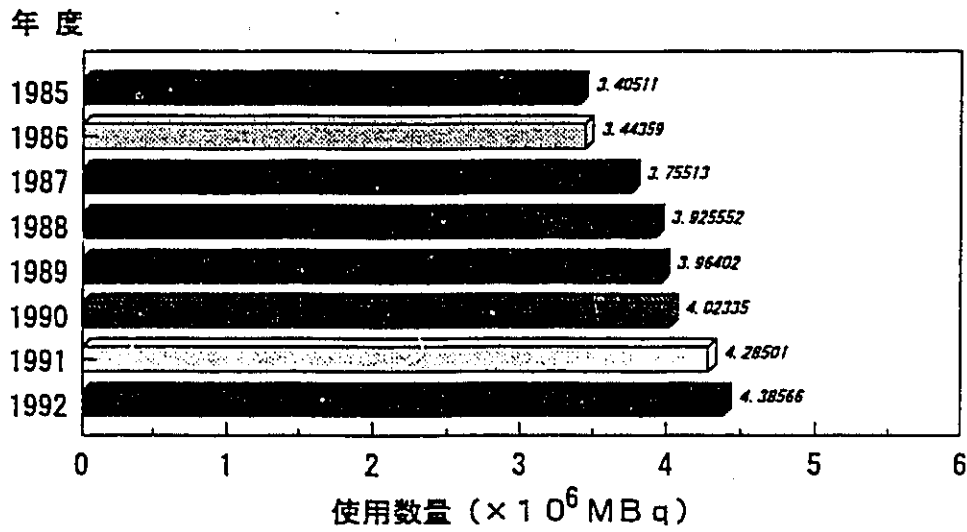
Tc-99m(Solution)



主な非密封アイソトープの使用数量

(昭和60年度～平成4年度)

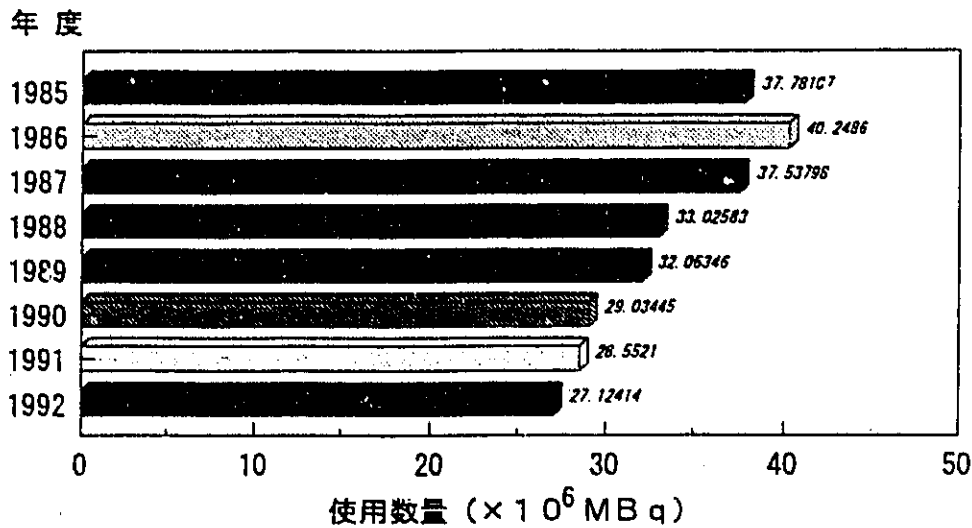
I-131



主な非密封アイソトープの使用数量

(昭和60年度～平成4年度)

Xe-133

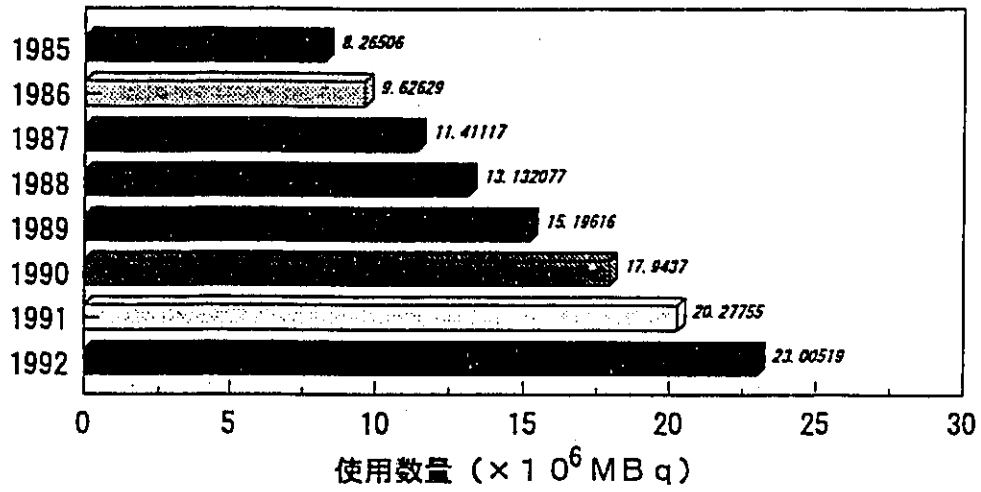


主な非密封アイソトープの使用数量

(昭和60年度～平成4年度)

II-201

年度



表① 密封アイソトープの使用事業所（医療機関）数—参考資料
（平成5年3月末日現在）

	半減期	主なβ線のエネルギー(kBecV)と その割合	主なγ線のエネルギー(keV)と その割合	照射線量率定数 (R・m ² ・h ⁻¹ ・Ci ⁻¹)	主な生成反応
Co-57	271d				
Co-60	5.271y	318(100%)	122(86%)	0.095	⁵⁶ Fe(d, n); ⁶⁰ Ni(p, α)
Ni-63	100y	65.9(100%)	1173(100%), 1332(100%)	1.30	⁵⁹ Co(n, γ)
Sr-90	28.8y	546(100%)		-	⁶² Ni(n, γ)
I-125	60.2d		35.6(6.7%)	-	U(n, f) ⁹⁸ Sn→
Cs-137	30.17y	512(95%)		0.025	²³⁸ U(α, 2n)
Ir-192	74.2d	536(41%), 672(48%)		0.32	
Au-198	2.696d	961(99%)	317(83%), 468(48%)	0.46	
Rn-222	3.8235d	α: 5490(100%)	412(96%)	0.23	¹⁹¹ Ir(n, γ)
Ra-226	1.60x10 ³ y	α: 4785(100%)		0.0023	¹⁹⁷ Au(n, γ)
Am-241	433y	α: 5486(85%)	186(3%)	0.825	²²⁶ Ra→
			59.5(36%)	0.16	
Cf-252	2.64y	α: 6118(82%)	43.3(0.015%)	0.3	²³⁹ Pu(n, γ) ²⁴⁰ Pu ²⁴⁰ Pu(n, γ) ²⁴¹ Pu→

表② おもな非密封アイソトープの使用数量—参考資料
(平成4年度)

	半減期	主なβ線のエネルギー(kEeV)と その割合	主なγ線のエネルギー(keV)と その割合	主な生成反応
Tc-99m	6.02h		141(89%)	$^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ $\text{U}(n, f)^{99}\text{Mo} \rightarrow$
Xe-133	5.25d	346(99%)	81(37%)	$^{132}\text{Xe}(n, \gamma)^{133}\text{Xe} \rightarrow$
Tl-201	73h		70.8(Hg-X)	$^{203}\text{Tl}(p, 3n)^{201}\text{Pb} \rightarrow$
Ga-67	78.3h		185(21%), 300(17%)	$^{65}\text{Zn}(d, n), ^{65}\text{Cu}(\alpha, 2n)$
I-123	13.0h		159(83%)	$^{121}\text{Sb}(\alpha, 2n)$
I-131	8.04d	606(89%)	364(81%)	$^{130}\text{Te}(n, \gamma)^{131}\text{Te}$ $\text{U}(n, f)^{131}\text{Te} \rightarrow$
Kr-81m	13s		190(67%)	$^{79}\text{Br}(\alpha, 2n)^{81}\text{Kr} \rightarrow$
In-111	2.83d		171(91%), 245(94%)	$^{111}\text{Cd}(p, n)$
I-125	60.2d		35.5(6.7%)	$^{123}\text{Sb}(\alpha, 2n)$
Cr-51	27.70d		320(9.8%)	$^{50}\text{Cr}(n, \gamma), ^{51}\text{V}(d, 2n)$
Fe-59	44.6d		1099(56%), 1292(44%)	$^{58}\text{Fe}(n, \gamma)$

表③ 医療利用が期待されるアイソトープ

	半減期	主なβ線のエネルギー (keV)	主なγ線のエネルギー (keV)	主な生成反応	
Gd	Sc-47	3.4d	162	159	$^{nat}Ti(p, 2p)$
	Cu-67	2.6d	141	185	$^{68}Zn(p, 2p), ^{67}Zn(n, p)$
	As-77	1.6d	228	239	$^{75}Se(p, \alpha)$
	Sr-89	50.5d	1489		$^{88}Sr(n, \gamma)$
	Y-90	2.7d	935		$U(n, f) \rightarrow ^{90}Sr \rightarrow$
	Rh-105	1.5d	152		$^{nat}Ru(n, \gamma) \rightarrow ^{105}Ru \rightarrow$
	Pd-109	0.56d	361	319	$^{108}Pd(n, \gamma)$
	Ag-111	7.5d	350	88	$^{110}Pd(n, \gamma) \rightarrow$
	Sn-121	27.06h	387	342	$^{120}Sn(n, \gamma)$
	Pr-142	0.80d	809		$^{141}Pr(n, \gamma)$
	Pm-149	2.2d	364	1570	$^{148}Nd(n, \gamma) \rightarrow ^{149}Nd \rightarrow$
	Sm-153	1.96d	223	286	$^{152}Sm(n, \gamma)$
	Gd-159	0.77d	311	103	$^{157}Gd(n, \gamma)$
	Tb-161	6.90d	460, 520	363	$^{160}Gd(n, \gamma) \rightarrow ^{161}Gd \rightarrow$
	Dy-165	2.334h	1290		$^{164}Dy(n, \gamma)$
	Ho-166	1.1d	666		$^{165}Ho(n, \gamma)$
	Er-169	9.40d	340, 348	80	$^{168}Er(n, \gamma)$
	Yb-175	4.19d	468		$^{174}Yb(n, \gamma)$
	Lu-177	6.7d	133	208	$^{176}Lu(n, \gamma)$
	Re-186	3.8d	349	137	$^{185}Re(n, \gamma)$
Re-188	0.71d	764	155	$^{186}W(n, \gamma) \rightarrow ^{187}W(n, \gamma) \rightarrow ^{188}W \rightarrow$	
Os-191	15.4d	142		$^{191}mOs \rightarrow, ^{190}Os(n, \gamma) \rightarrow ^{191}Os$	
Os-193	30.6h	1130		$^{192}Os(n, \gamma)$	
Ir-194	0.80d	808		$^{193}Ir(n, \gamma)$	
Au-199	3.1d	86	328	$^{198}Pt(n, \gamma) \rightarrow ^{199}Pt \rightarrow, ^{197}Au(n, \gamma), ^{198}Au(n, \gamma)$	
Bi-210	5.012d	1160	158	$^{209}Bi(n, \gamma), ^{210}Pb \rightarrow$	
F-18	1.83h		β+	$^{18}O(p, n), ^{15}O(\alpha, np)$	
Cu-62	9.73m		β+	$^{63}Cu(p, 2n) \rightarrow ^{62}Zn \rightarrow$	
Cu-64	12.8h	578	β+	$^{63}Cu(n, \gamma)$	
Ga-68	78.3h		β+	$^{68}Ge \rightarrow$	
Rb-82	1.25m		β+	$^{85}Rb(p, 4n) \rightarrow ^{82}Sr \rightarrow$	

7-4-2 宇宙での応用

原子力開発と並んで巨大技術開発である宇宙関連技術でもその開発が他分野の技術開発にどう影響を与えるか大きなテーマになっている。ここでは宇宙基地建設についての技術が地下利用技術として実施できないかどうかを検討した。

(詳細は別添資料)

8 原子力分野が他分野と交流を促進するための提言と今後の課題

8-1 提言と課題

8-1-1 提言

これまでに触れてきた原子力における個別の技術分野に対する他分野での応用可能性、原子力技術と他分野の交流の阻害要因などを踏まえ、原子力技術と周辺技術の交流を活発化するための方策を提言の形で11項目にまとめてみた。

(1) 国の長期計画の柔軟な運用を可能にし、計画をエネルギー政策としてだけでなく科学技術政策として明確に位置づけるべきである

すでに長期計画をエネルギー政策としてだけでなく、科学技術政策の一環としてとらえる考え方は打ち出されている。しかし、現状では考え方が緒についたばかりであり、長期計画の全体を通してこれが浸透するまでには至っていない。今後ともこの考え方を拡大していく国としての努力が必要である。

さらに、長期計画に基づいて実施される各プロジェクトは、エネルギー政策という立場からはそれなりの評価がなされているが、科学技術政策という立場からの評価はまったくなされていない。プロジェクトの中で提案された技術の芽や、開発された成果について、エネルギーという立場を離れた評価を行い、国や関係機関としてそれをどう育てるべきかを検討することも、計画に柔軟性を持たせる一つの方法ではあろう。この際、その後の技術の発展については、原子力関連機関にこだわることなく、場合によっては提案者を他機関に異動させることも含めて、原子力とは別の視点から取り組むことも検討に値するであろう。政策の中にこのようなメカニズムをつくることによって他分野との交流が促進できると考える。

(2) 原子力の研究開発を、社会、ユーザー、国、スポンサー、研究開発主体、他分野の研究開発主体などを含んだ技術開発システムとしてとらえるべきである

原子力の研究開発に見られる過剰とも言える合目的意識は、研究開発を狭い視点でとらえているところに原因があるように思われる。極言すれば、研究開発を進めるに当たって、ユーザーである電力（電力以外がユーザーの場合もある）、スポンサーとしての国（狭くは大蔵省）だけを考えているともいえる。しかし、本来の研究開発は、どんな分野であれ、社会を構成するさまざまな要素と深く関わって進んでいる。

つまり、原子力の研究開発も広い社会システムの構成要素の1つであり、周辺を含めて1つのサブシステムを構成していると考えるべきである。社会のどの部分がサブシステムの構成要素か、その構成要素の相互関係はどんなものを十分に検討し、そこから原子力の研究開発のあり方を再構築するような作業も必要である。

このような努力によって、エネルギー分野以外の多様な目的を設定することもできるはずである。さらに、サブシステムの他の構成要素とどんな関係を維持すべきか、関係をどう改善すべきかの判断も可能になる。

(3) 研究開発に従事する技術者に対し、エネルギー以外の分野についての意識を向上させるべきである

原子力の研究開発に従事する技術者の関心がエネルギーに向くのは当然である。しかし、せっかくの新しい技術のヒントも、固定観念にとらわれていては実現できないで見過ごすことが多い。研究開発を社会システムの中のサブシステムとしてとらえ直すと同時に、技術者が広い関心を持つことも極めて大切である。

原子力の研究機関の技術者を、エレクトロニクス・情報、自動車、宇宙開発などまったく違った分野の研究機関に一時期出向させて、違った世界の技術文化、価値観などを経験させるのも1つの方法であろう。また、企業人がしばしば組織する異業種の人々の勉強会などに参加させることも必要である。他分野の知識、文化を身につけていてこそ、他分野との交流に積極的になれるし、他分野で応用できる技術の芽も発見できる。さらに、雑多な情報空間に身を置くことが、創造性の1つの原点になっていることを認識したい。

(4) 研究開発に従事する関係者が、日本の先端技術を支えているという誇りを持つよう意識改革する必要がある

原子力は総合エンジニアリングであり、国が支出する研究開発費としては最大級の投資をしている分野である。当然のことながら、様々な分野の最先端技術を牽引する力を秘めているはずである。安全性という面から未熟な技術を実際に使うことはできないにしろ、研究開発では最先端を担うことができる。

原子力の研究開発に従事する技術者に、このような意識と誇りがなければ、研究開発に当たり原子力で使う技術を他分野から物色するという姿勢になりかねない。他分野との相互交流を実現するには、まず技術者の誇りが大切である。

(5) 技術開発のプロジェクトチームを編成する場合、原子力関係者だけではなく他分野の研究者などを適時集めることを考えるべきである

現在のところ、原子力分野のプロジェクトチームを構成する場合、原子力関係機関の技術者が中心になる。外国の例を見ると、プロジェクト毎に、原子力以外の機関からもそれぞれの分野の専門家が集められチームを構成、プロジェクトの進行によって自分の仕事が終了すると元の場所に帰るという方式をとる国もある。この方式はアドホック型と呼んでもいいだろう。

アドホック型が日本に適するかという疑問は強い。終身雇用制だし、ある期間本来の職場を離れているとその後が不利になるということも考えられる。しかし、流動研究員制度など、研究者の流動性を高めようという動きも高まっている。他分野との技術交流は人の交流がもっとも近道である。アドホック型のチーム編成が可能になれば、原子力技術の他分野への波及だけではなく、他分野の優れた技術や文化を原子力に取り込むのにも役立つはずである。

(6) 技術開発のプロジェクトチームに成果を他分野で使えるようにするための支援部隊を参加させるべきである

上記のアドホック型に無理があるとすれば、他分野と交流するための支援部隊となる専門家をチームに参加させることが考えられる。例えば、地下深部における水流の解析だが、この研究成果は情報処理技術としても様々な新しいアイデアを含んでいると考えることができる。このチームに情報処理の専門家が参加していれば、どのアイデアが新規であるか判断できるし、それをどんな概念で整理すれば情報処理の成果として受け入れられるかという翻訳も可能になる。さらに、一般化して誰でも使えるようにするには何が欠けているかを判断し、補完することもできる。

(7) 研究開発を進めるに当たり、合目的に効率を重視するだけでなく、科学領域にまで立ち戻った姿勢が必要だし、成果の一般化についても努力すべきである

7-2で述べたように、原子力の技術開発は、磨けば光る玉なのに磨かれていない、という側面が強い。他分野との交流を考えるにはどうしても玉を磨く努力が必要である。前項で指摘した支援部隊の参加も、いわば磨く一つの方策である。

研究者はある現象を発見したとき、それが発生するメカニズムを解明したいと考えるのが自然である。科学の領域まで踏み込みたくなるのが研究者の常である。プロジェクト研究などで合目的にスケジュール通りに研究開発を進めたいと考えると、研究者のこのビヘイビアは往々にして邪魔になる。合目的、効率を重視すると研究者の知的好奇心を殺すことになりかねない。知的好奇心こそが普遍性のある、つまりどこの分野に行っても通用する知見を得るための原動力である。

エネルギー政策であり、国のプロジェクトであることを考えると、効率や合目的という考え方は重要である。しかし、技術の交流、広い視野からの社会に対する貢献という面からみると、それだけで満足することはできない。研究者の時間の一部を自分の興味のために使えるよう配慮するなど管理の面での工夫が必要である。

(8) 機密を要する情報と不要な情報の仕分けを明確にし、機密として取り扱う情報を最小限にとどめるよう努力をすべきである

原子力の技術には、特に核物質防護の観点から、ある程度の機密事項があるのは国際的な約束であり、やむを得ないと判断できる。しかし、一般論として機密を要する情報と、そうでない情報を明確に切り分ける判断は難しいし、その作業も大変である。往々にして、この煩雑さを回避するため、機密の必要がない情報も機密扱いすることが起こる。原子力の技術開発でも同様な状況が起こっていないか十分にチェックする必要がある。

その上で、機密情報を必要最小限にとどめ、公開情報を多くすべきである。情報の公開こそ、他分野との交流の基本的な条件である。研究者に対しても、安易な機密扱いを慎むよう、指導するべきだし、そのための管理者の努力が必要である。

(9) 研究開発への取り組み方を含め、原子力の成果を社会全体、他分野の技術者に知ってもらうための戦略を用意する必要がある

原子力以外の研究者が原子力分野の研究やその成果を知るのは、わずかに新聞などで取り上げられたものだけである。原子力における広報活動は、どうしてもエネルギーとしての原子力に関心が向くのはやむを得ない。しかし、他分野との広い交流を考えた場合には、エネルギー以外の視点からの広報活動も必要である。原子力の研究開発機関は、エネルギー広報とは別に、技術広報の専門家を置くなどの新しい工夫が望まれる。その上で、見落とされがちな研究開発成果を積極的に社会に情報発信していくことを考えるべきである。

上記のような施策を取っても、まだ専門家間の技術交流という意味では不十分である。原子力の研究者が原子力・エネルギー関連の学会で成果を発表するのは当然である。これに加えて、自分の研究成果を他分野の学会で積極的に発表していく習慣が必要である。研究管理者も、原子力関連の学会での発表だけではなく、他分野の学会での発表を抑制することなく、積極的に勧める態度が必要であろう。

(10) 安全性に対する考え方、国際交流のあり方など原子力の技術開発が培った独特の文化がある。技術成果だけではなく文化についても他分野で大いに参考になることを認識すべきである

それぞれの技術分野は、歴史や社会的要請、技術開発システムのあり方などからくる独特の文化を持っている。特に原子力では、安全に対する考え方、マンマシンシステムに対する考え方、遮閉に対する考え方、耐久性や寿命に対する考え方などで、他分野にはない独特の文化を持っていると考えられる。これらの文化は、技術成果と同様に他分野でも大いに参考になるはずである。技術だけでなくこれらの文化についても他分野との交流が望まれる。

文化は、学会での発表や、新聞発表だけで伝えられるものではない。人間と人間の交流が必要である。このような視点からも、研究者の交流や、外部の勉強会などへの参加が望まれる。

(11) 特許戦略、コスト意識など研究開発の周辺についても、他分野との交流という視点から見直す必要がある

(10) で示したのと逆に、他分野から学ぶべき点も多いはずである。例えば、特許を考えると、権利の請求範囲をエネルギーだけに絞れば、権利はその範囲でしか確保できない。技術の様々な応用範囲を想定し、請求範囲を可能な限り広く取るのが普通である。特許戦略についても点検してみる必要がある。

また、原子力の技術開発は国のプロジェクトで行われる場合が多いため、コスト意識が希薄である。普通の産業分野では、コストが最優先している。この点についても学ぶ必要があるだろう。

8-1-2 今後の課題

今年度の調査・研究では原子力の技術開発について、きわめて狭い領域について個別的な検討を加え、ここから周辺との交流を考える上での障害や方策を検討した。他分野との交流について、原子力に関わる研究機関が真剣に取り組むためには、さらに詳細かつ具体的な検討が必要である。また、個別分野の交流を考えるには、それぞれの分野の特有な条件があり、この条件についても十分に配慮する必要がある。このような視点から考えると、交流に関する今後の検討課題として次のような点をさらに取り上げる必要がある

- (1) 今回取り上げた情報処理・コンピューター利用、材料開発、隔離・密閉技術以外の分野について、原子力の各個別技術について、その特色、技術水準、他分野での応用可能性などについて検討する必要がある
- (2) 各個別分野の状況について分析し、横断的に考えるべき技術交流のための条件、それぞれの分野で考えるべき交流の条件を抽出する
- (3) (2) で求めた条件に対し、どんな対応策があるかを検討する必要がある。言い替えれば、8-1-1で述べた提言をさらに検討し、具体化する必要がある
- (4) 各対応策について、現行の制度や法律、各機関の管理のあり方などに関連を明確にし、制度や法律の改正、組織やその運営体制の改善に結び付ける

以上

8-2 動燃事業団の役割

原子力以外の分野との境界分野に存在する技術開発課題が明確であれば、動燃事業団としては、積極的にその課題に取り組むことに、本質的にはためらいはないであろう。

しかしながら、「なぜ、動燃が・・・」と言った問いかけがなされた場合、答えを用意しておくことが不可欠である。この答えの筋が、動燃自身、あるいは、監督官庁（科学技術庁）の判断から、「不相当」とされれば、当然、その課題への取り組みは不可能となる。

本音と建前の使い分けということがある。

筋論で予算化した後、実施する、いわゆる正攻法と、担当部署（課題に興味を示した実施部署）の懐の中で芽出しの挑戦を実施し、課題のある程度の発展シナリオが描ける状態に成果を整え、その上で動燃事業団が実施可能な理屈を構築していく独断専行的、後付け理由により実施する方法とがある。

前者を唯一の方法と捉えていれば、恐らく、清算的事業に関連した課題しか残らないかも知れない。

他分野の関心が奈辺にあるのか。何をすれば他分野から興味を示されるのか。原子力の門戸を開放する具体的プログラム（ソフト&ハード）の斬新な策定が当面、重要な課題である。と同時に、理屈を考える前に興味・関心を具体的な形に構築していく「挑戦する」考えを浸透させることが喫緊の課題である。

8-2-1 環境の整備

(1) セレンディビティの育成環境の構築

セレンディビティという言葉は、ホレス・ウォルポールが1754年に友人のホレス・マン卿に送った手紙の中で使われている。ウォルポールが「セレンディップの3人の王子」の冒険（セレンディップとはセイロン、つまり今のスリランカの古称のこと）というおとぎ話を読んで感心したことに始まるが、この王子たちというのが、はじめから意図してではなく、いつでも偶然に、しかもうまい具合に、いろいろなものを発見してくるのである。ウォルポールはこのセレンディビティという言葉で、自分自身の偶然によるいくつかの発見を表現するのに使った。

「偶然と洞察力による発見・発明」をセレンディビティという言葉で、ウォルポールは表現し述べようとした。(Royston M. Roberts, "SERENDIPITY -Accidental Discoveries in Science", 1989, John Wiley & Sons, Inc., 安藤番志 訳"セレンディビティ" 1993, 化学同人)

セレンディビティは全てを偶然に期待するのではなく、あらゆる現象に立ち止まって、関心を示す癖と経験を活かした洞察力が伴うことの必要性を表現する言葉でもある。

研究機関の姿勢としては、研究者・技術者が、清算的業務であっても、フロンテ

イア的であっても、このセレンディビティが生まれる、生まれ易い環境を整える必要がある。

原子力の枠の中では、情報の交流範囲が限られており、自由な発想を具体化するための障害が体制、規制、人の資質等に存在していることを否定できない。先ずは、他分野の様々な研究者・技術者と情報交流が自由にできるシステムを作る必要がある。

また、セレンディビティを奨励する動燃ソフトも必要である。

(2) 専任業務の分業化と経験範囲の柔軟性

セレンディビティが発揮されにくい原因の一つとして、法制度に基づく業務を、研究者自身が実施しなければならないジレンマがある。特に、原子力関連の研究の立ち上げには、必ず、許認可申請に関わる膨大な作業を伴う。そして、その課題を担当（実施）しようとする者が、この申請作業を行わなければならない「しきたり」が存在している。

これが、研究への熱意を削ぎ、時間的無駄（迅速な成果の期待に対して）を産んでいる。

よく考えれば、このような手続きは一般的にはルーチン作業であり、経験を積んだ者の方が新人より、また、事務職の方が研究職より、手際よく実行できる。

原子力に関わるこのような事務処理を一環して代行するスペシャリスト集団が内部であれ、外部であれ、存在しておれば、研究者のタイムリーなセレンディビティの機会は頻度が増すであろう。

しかし、専門だけを知っておればよいというのであれば、経験からくる洞察力の育成は不十分である。事務業務を通じての情報ネット、マネジメント能力、予算システムの把握等は、研究者にとっては不可欠な背景資産であることを考えれば、積極的に一度は、研究者にこのような事務業務を経験させることも必要である。

これらを勘案した作業の区分化・分担化の促進と経験のための人事のシャフリングのソフトを構築することも課題であろう。

(3) 課題公募システムと管理委談

様々なセレンディビティの例の中で、研究者のバリエーションが有益であることには、説明は不要であろう。

原子力の外部からの研究者の受け入れに対しては、原子力機関だけの責任と関連機関の立て割り制度が大きな障害となっていて、充分とは評価できない。

動燃施設を試験開放型として初めて研究者の自由な交流が実現する。

そのためには、交流の先進的機関である国立研究機関のソフトを模倣する方法もあるが、ここでは、その国立研究機関に一旦組み込まれた人材を動燃との関係で受け入れる方法を提案したい。

この提案は、受け入れる対象者は、動燃が公募した研究課題の起案者・実施者であって、その研究予算は動燃が、彼らの代行機関として、彼らの研究費を動燃予算として認可を受けることを柱とする。すなわち、動燃は、保有する施設・設備を活

かした研究開発課題を公募し、その中から年次で実施するに適合した課題を動燃の責任で選別し、起案者が自ら動燃施設で実施することを前提として、予算を要求する。そして、起案者がスムーズに動燃施設を共有できるように、国立研究機関の身分を保証することである。

更に、動燃の立地サイト近傍の研究機関、教育機関に施設の管理を一部委譲し、その機関に課題を出させ、動燃が代行して予算化するシステムも検討可能であろう。

8-2-2 役割

(1) 革新的技術開発の基盤拡充

民間企業等においては、直接利益が見込めない研究には、積極的な取り組み姿勢がなかなか見られないのが現状である。

原子力という非常に大きな器の中であれば、原子力関連の技術として開発が可能な課題が、そのような民間企業のアイデアの中に存在する可能性があるであろう。

また、動燃の開発している（しようとしている）研究の中にも、民間企業の製品化に影響を及ぼす要素研究があるかも知れない。

いずれにしても、技術が具体化され、その実態が公開されて初めて、一般への適用が進むことを考えれば、セレンディビティを大切にしつつ、汎用範囲、対象を様々な人に検討してもらう機会を作ることが重要である。

我が国の技術基盤の拡充に有益であり、国際技術摩擦の問題を軽減させるためにも、開発成果の一般への適用を積極的に考えていかなければならない。

(2) 研究成果のポケット収納

(1)の成果の公開とは、矛盾する話しであるが、何でもかんでも成果の早急な公開は、間（ま）を置くことも重要である。なぜなら、技術が一般に受け入れられるには、そのための土壌が必要であり、無謀に、性急に公表して、進展にブレーキがかかると、以後の研究が継続できなくなることもある。

技術によっては、芽出しの段階で、ポケットにしまっておき、「このような技術はないのか」という声を受けて、取出し公表することも考えてよいのではなかろうか。

迅速な公表は、昨今の超電導材料や低温核融合の現象の中に一部見られるような、売名的な捏造報告が出てくる可能性を否定できない。

原子力技術そのものが、技術の出し方が間違っ、軍事技術へと発展したこともある。研究者と管理者が、成果の公表が全てであることではなく、技術は世のため、人のために役立つことが重要であることを勘案して、成果をポケットにしまっておける余裕も重要であろう。

むしろ、その技術成果が、一般に有益である結論を見つける検討を、様々な分野の人と意見交換できる技量が必要であろう。

(3) 技能技術の底上げ

先端分野、革新的先導的技術、フロンティア研究とは異なり、原子力技術の中に

は、「職人」的技（わざ）、まさに「匠」を要求される分野もある。

マスマシニングに対して、手作りの味というものである。老練な技能技術は原子力においても必要である。

積極的に我が国の「匠」と関連できる技術を手掛け、伝統的工夫の伝承を受け継ぐことも重要であろう。原子力においては、「からくり」の秘匿性はなく、むしろ、現代的技術とハイブリッドして新たな分野を構築している幅が広がる。

また、原子力技術では遠隔操作が重要であり、ますます操作の職人芸が求められる。

これは、誰でもが容易に使いこなせる車のドライバー的状况から、ジェットパイロット的なより高度な技能を必要とする状況へと変遷してきているということである。

高価で繊細なシステムは、間違った操作による代償は極めて深刻となる。原子力の遠隔操作は、映像による操作が多くなれば、マイクロマシニング、深海／宇宙での極限ロボット操作、バイオテクノロジーでの顕微鏡操作等と類似点が多くなり、VR（バーチャルリアリティ）操作の分野として広がる可能性もあり、原子力の中で技能者育成のシステムを作ることが期待される可能性がある。

8-2-3 総括

他分野との境界領域の課題を動燃が実施するという事は、課題を見つけることだけではなく、課題への取り組みが迅速に実施可能なソフトを構築することである。

すなわち、セレンディビティの重要性を認識し、セレンディビティが生まれ易い環境を構築し、研究者の自主的発想の能力を高める教育と発想の芽を育成できる経験を積ませることのソフトを整備し、運用することが、当面の動燃事業団で取り組まなければならない課題であろう。

研究成果、開発技術は、あくまで、世のため、人のために役立つことが目的であり、そのためには、戦略を立てて成果を公表していくことが大切である。

中々、一般企業では着手できない課題、アイデアはあっても人と予算がないもの、これらの中で、原子力技術として要素（基礎）研究が実施できるものがあれば、積極的に取り組むことも重要である。

9. 調査委員会の構成

(肩書きは平成6年1月現在)

主査	機械振興協会副会長 (元工業技術院院長)	杉浦 賢
委員	工業技術院機械技術研究所顧問 (前同研究所所長)	佐藤寿芳
	工業技術院電子技術総合研究所情報科学部長	諏訪 基
	科学評論家	佐々木孝二
	動力炉・核燃料開発事業団企画部長	菊池三郎
	東京大学工学部教授	北沢宏一
	慶応義塾大学医学部放射線科学教室専任講師	中村佳代子
	東芝 原子力事業部技術顧問	野本昭二
事務局		
	日経産業消費研究所研究部長	鳥井弘之
	同 首席研究員	江口正人
	同 研究員	木ノ内敏久
	同 研究員	和田 勉
オブザーバー		
	動燃事業団 核燃料サイクル技術開発部 部長	榎原英千世
	同 同 担当役	衣笠 学
	企画部 主査	内藤明礼
	核燃料サイクル技術開発部	大木耕一