

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。

2002. 2. 25

[技術情報室]

第 I 期フロンティア研究成果報告会 (関連資料集)

1 9 9 5 年 1 2 月

動力炉・核燃料開発事業団

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

して下さい。また、今回の展示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13
動力炉・核燃料開発事業団
技術協力部 技術管理室



社内資料

PNC 1410 95-106

1996年12月

第Ⅰ期フロンティア研究成果報告会（関連資料集）

フロンティア研究推進室*

要 旨

動燃事業団は、平成7年11月20日に東京（虎ノ門パストラル）で「第Ⅰ期フロンティア研究成果報告会」を開催した。本報告会では、当事業団が昭和62年度から取り組んできたフロンティア研究について、平成4年度までの成果を第Ⅰ期研究成果として取りまとめ、関係者を対象に研究成果を披露するとともに、最近のトピックスとして消滅処理技術開発の現状について紹介した。

本資料は、「第Ⅰ期フロンティア研究成果報告会」のOHPシート、特別講演を頂いた東京工業大学工業材料研究所長の澤岡昭教授の予稿集、質疑応答、アンケート結果及び付録として当日使用した「第Ⅰ期フロンティア研究成果報告会（要旨集）」で構成される。

* 動力炉・核燃料開発事業団 本社 核燃料材料技術開発部 フロンティア研究推進室

目 次

	頁
1. 研究成果報告会プログラム	1
2. フロンティア研究の概要 (OHPシート)	5
3. 特別講演「極限技術と材料」	11
4. 研究成果報告 (OHPシート)	
(1) レーザー同位体分離技術	19
(2) 光溶液化学の研究	41
(3) 自律型運転制御システムの開発	55
(4) 新概念高速炉の研究	71
(5) フラーレンに関する研究	83
(6) 原子力用新材料の創製	105
5. 最近のトピックス (OHPシート)	
(1) 消滅処理研究	121
(2) 大電力電子線形加速器の開発	133
6. 質疑応答	151
7. アンケート結果	157
付録「第 I 期フロンティア研究成果報告会 (要旨集)」	161

1. 研究成果報告会プログラム

第 I 期 フロンティア研究成果報告会
- 動力炉・核燃料開発事業団 -

平成 7 年 1 1 月 2 0 日 虎ノ門パストラル 本館 8 F けやきの間

- プ ロ グ ラ ム -

1. 開会挨拶 (13:15-13:20) 動力炉・核燃料開発事業団 理事 井田勝久
2. フロンティア研究の概要 (13:20-13:30) 核燃料サイクル技術開発部 部長 山村 修
3. 特別講演「極限技術と材料」 (13:30-14:20) 東京工業大学 工業材料研究所 所長 澤岡 昭
4. 研究成果報告
 - (1) レーザー同位体分離技術 - 物質の極限分離への応用 - (14:20-14:40) 東海事業所 新型濃縮技術開発室 室長代理 須藤 收
 - (2) 光溶液化学の研究 - 光で制御する溶液反応 - (14:40-15:00) 東海事業所 室長 先端技術開発室 和田幸男
 - (3) 自律型運転制御システムの開発 - 運転員の代替を目指して - (15:00-15:20) 大洗工学センター 担当役 先進技術開発室 小澤健二
 - (4) 新概念高速炉の研究 - 高速炉の多角的利用を目指して - (15:20-15:40) 大洗工学センター 担当役 先進技術開発室 大坪 章
 - (5) 質疑応答 (15:40-15:50)
- 休 憩 (1 0 分)
- (6) フラールンに関する研究 - 新しい炭素機能材料を求めて - (16:00-16:20) 東海事業所 室長代理 先端技術開発室 船坂英之
- (7) 原子力用新材料の創製 - 極限環境に耐える材料を目指して - (16:20-16:40) 大洗工学センター 担当役 先進技術開発室 加納茂機
5. 最近のトピックス - 核分裂生成物の放射能を消滅させる -
 - (1) 消滅処理研究 (16:40-17:00) 東海事業所 副主研 先端技術開発室 原田秀郎
 - (2) 大電力電子線形加速器の開発 (17:00-17:20) 大洗工学センター 担当役 先進技術開発室 江本 隆
 - (3) 質疑応答 (17:20-17:30)
6. 懇親会 (本館 8 F しらかばの間) (17:45 ~) 司会 フロンティア研究推進室 室長 島崎善広

2. フロンティア研究の概要

フロンティア研究の概要

平成7年11月20日

核燃料サイクル技術開発部

山村 修

原子力開発長期計画

〔原子力委員会 昭和62年6月22日公表〕

〔原子力開発利用の基本目標〕

- (1) 原子力をエネルギー供給構造の脆弱性の克服に貢献する基軸エネルギーと位置づけ開発を推進する。
- (2) 創造的研究開発の指向、他の科学技術分野との連携、交流により時代の創造的な科学技術の育成に努める。
- (3) 原子力平和利用推進国としての国際的責務を果たしつつ、欧米の主要先進国とともに原子力開発利用推進の牽引者として積極的に国際社会に貢献していく。

フロンティア研究推進の趣旨

1. 事業団プロジェクトの実用化に向けたブレークスルーの追求
2. 長期的視点に立ったフロンティア研究の推進 —プロジェクトへの適用の観点を離れて—
 - ・ブレークスルーを生む可能性のある技術
 - ・プロジェクトとなり得る可能性のある技術
3. 基礎・基盤科学的研究の領域を含めた研究範囲 —技術開発領域に留まらない—
4. 研究成果の反映
 - ・プロジェクト技術への反映
 - ・他分野への波及

フロンティア研究範囲

1. 基礎・基盤研究

『事業団の研究開発の枠組みの外』 & 『事業団のポテンシャルが発揮可能な分野』

— 将来のプロジェクトとなり得る可能性を秘めた研究

— 技術的ブレークスルーを生む可能性のある研究

— 事業団のポテンシャル向上に貢献し得る研究

2. 新概念研究

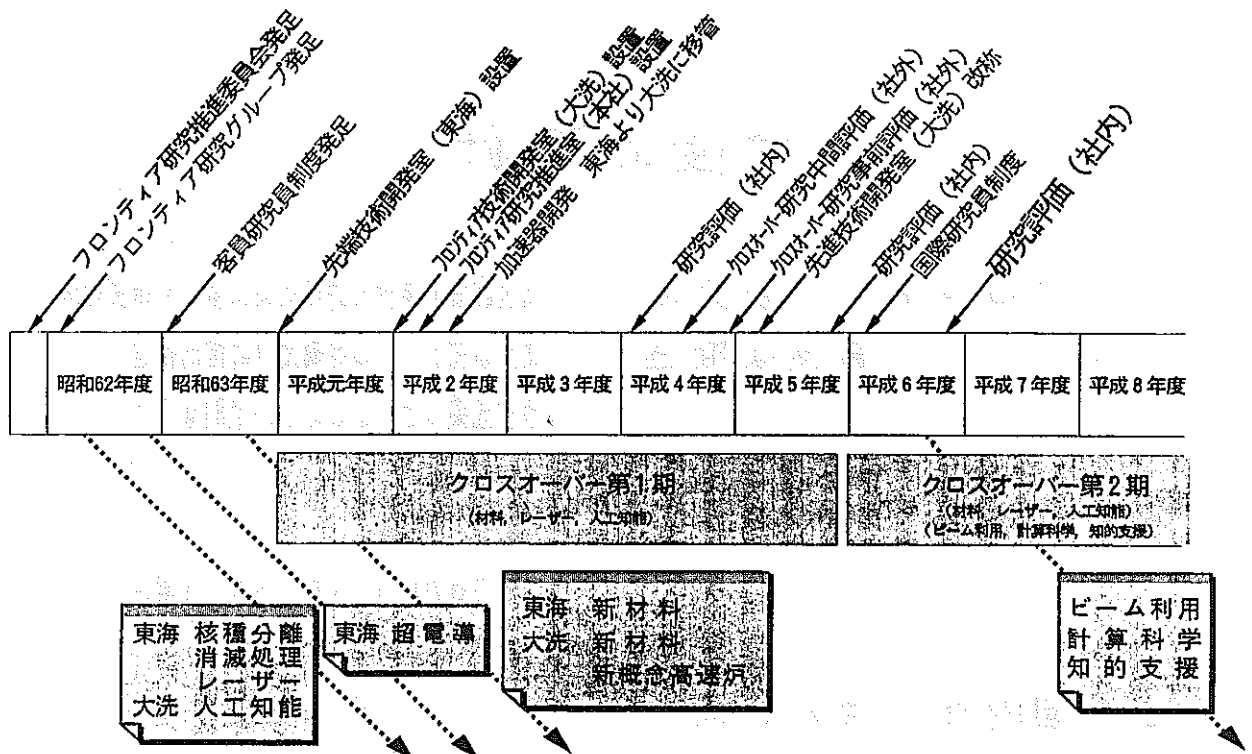
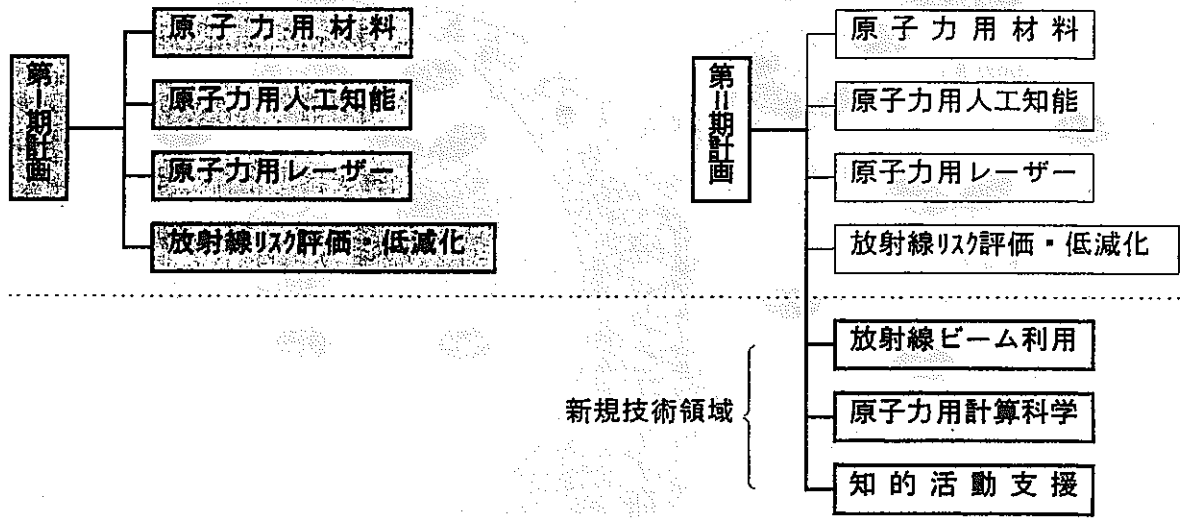
『プロジェクトの主要目標に関連するが、現時点での直結性はない』

& 『現在のプロジェクト等の概念を大幅に変える革新的研究』

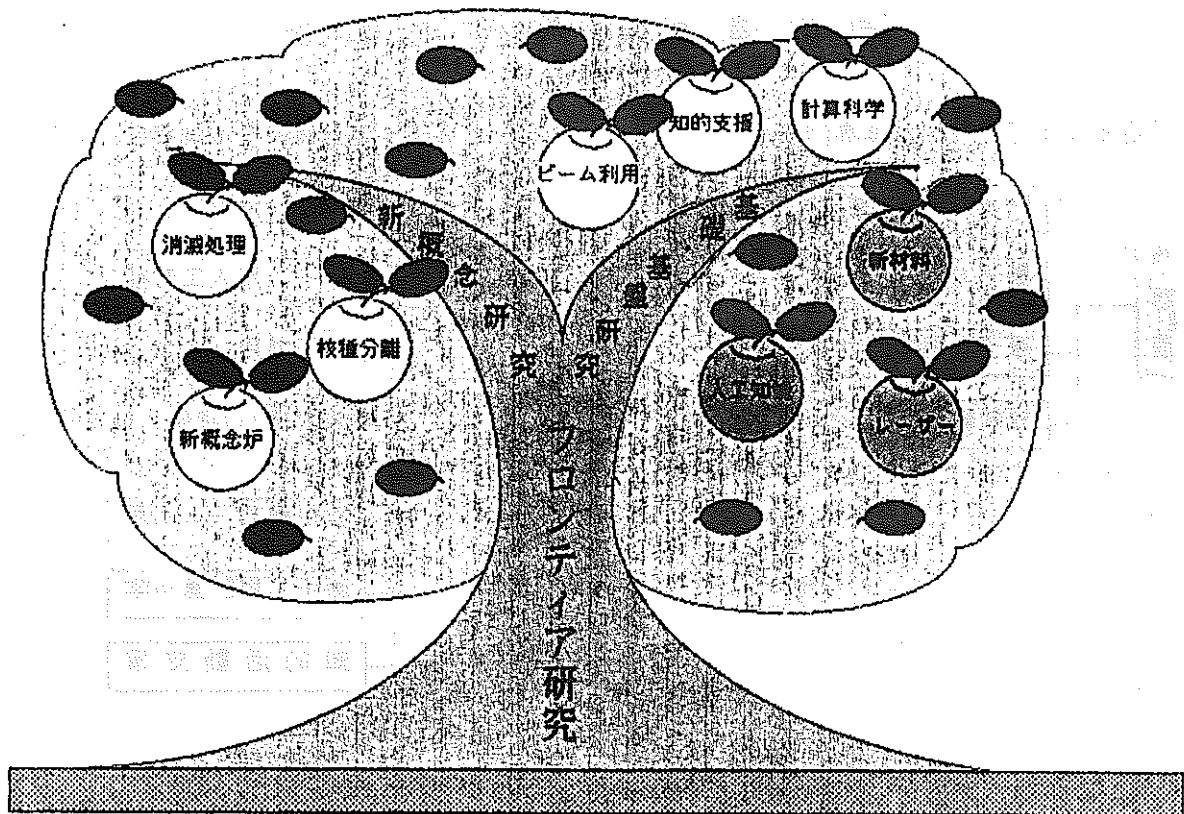
国の基盤研究技術領域

(昭和63年基盤技術推進専門部会)

(平成5年基盤技術推進専門部会)



フロンティア研究の経過



動燃におけるフロンティア研究分野

今後の方針

1. フロンティア研究の
着実な推進
 - ・ 研究評価の実施と評価結果に基づく研究推進
 - ・ 新規研究テーマの発掘及び計画的推進
 - ・ 研究成果のとりまとめと効果的なアピール
2. 研究の効率化
 - ・ 重要テーマの選定
 - ・ 資源の有効利用（人材，予算，設備等）
3. 国内外交流の促進
 - ・ クロスオーバー研究の推進
 - ・ 国際協力の推進

3. 特別講演「**極限技術と材料**」

極限技術と材料

東京工業大学 工業材料研究所

所長 澤岡 昭

はじめに

新しい材料を創り出すアプローチの仕方は様々であるが、ここでは、極限技術を利用した方法について述べ、このことの研究開発上の位置付けを行ってみたい。ここで例として取り上げる極限技術は宇宙の微小重力を利用する微小重力プロセッシングと衝撃超高圧を利用するダイナミックコンパクションである。結論の一つを最初に言ってしまうと、これらの極限技術は大変コストがかかるもので、この方法によって、今までにない優れたものができても、製造技術としては多分使うことができないであろう。

極限技術はより早く、理想に近い材料を手にする手段である。それを手にすることができたなら、次に、なるべく簡易な方法によって、いかにして類似のものを得るかの努力をする。これが、宇宙材料実験をはじめとする、極限技術の利用の基本精神ではないかと考えている。

微小重力材料プロセッシング

筆者は15年以上に亘り、NASAのスペースシャトルを利用する宇宙材料実験プロジェクトの推進役を努めてきた。また、北海道の地下無重力実験センターの落下カプセルの建設にも多少関係してきた。まず、ここでは、まず宇宙材料実験そのものを知っていただく意味で、1992年に毛利衛さんが搭乗しておこなわれた行われたスペースシャトルを利用した宇宙材料実験、ふわっと'92 (FMPT) について実験技術の観点から述べてみよう。

技術的側面からみたふわっと'92

FMPTは22件の物質・材料・流体実験と13件のバイオ・ライフサイエンスの実験から成っている。実験結果の詳細は昨年、宇宙開発事業団より、2冊のふ厚い成果報告書として刊行されている。この報告書を手にとると、15年の重みを感じられる。1979年のテーマ提案から、成果報告まで15年間を要したからである。

筆者が個人的にこれは面白いと興味を持った実験結果は少なくとも3件はある。第一が阪大の浜川グループによるSi-As-Te系のアモルファス半導体に関するものである。アモルファスは非晶質とも呼ばれ、原子がバラバラの状態で固化した個体のことである。ガラスも原子の規則的な配列がない材料であり、アモルファスの一種である。原子が規則的に配列すると結晶になる。Si (シリコン)、As (ヒ素)、Te (テルル) は比重や密度、融点が著しく異なっており、それぞれの元素を混ぜて溶融しても、均一な混合物にならない。密度の小さなものほど浮き上がってしま

う。宇宙の微小重力下では均一な混合物ができることが期待された訳であった。

Si-As-Te系アモルファスを半導体として働かせるためには、各種の元素を微量加えてn型やp型の半導体に変える必要がある。浜川らは宇宙製のNi（ニッケル）を添加したSi-As-Te系のアモルファス半導体は、地上で調整したものにくらべ、電気電導度が100万倍も増加することを発見した。これは宇宙ではNi原子がSi-As-Te中に均一に分散したことを示している。

NTT基礎研究所が提案したPb（鉛）・Sn（スズ）・Te（テルル）系の結晶成長実験において、黒鉛製シリンダーと窒化ホウ素製ピストンからなる試料容器の隙間から融けた試料が漏れ出すというトラブルがあった。漏れだした試料が浮遊状態で球状に凝固し、球状単結晶が多数得られるといううれしいハプニングがあった。今後の新しい実験テーマとして興味をもたれるところである。

科学技術庁金属材料技術研究所の中谷功博士らは、イメージ炉を使ってInSb（インジウムアンモチン）の浮遊帯域移動による結晶成長実験を行い、結晶の純度が著しく向上することを見出した。イメージ炉とは、回転精円体の凹面反射鏡と強力なランプを組合せた加熱炉のことである。1対の凹面鏡のそれぞれの焦点の位置には200Wのハロゲンランプがおかれ、もう一つの焦点の位置に試料が置かれる。ハロゲンランプのフィラメントから放射された光は反射鏡で反射し、試料表面の一点に集光する。

双楯円型イメージ炉においては、円柱状の試料の背腹の両側から加熱することになるので、試料を回転させて、帯状に均一に加熱する。イメージ炉を使用して、柱状の原料の一部を溶融させながら、集光部をゆっくり移動させて結晶を成長させる方法は、浮遊帯域移動法と呼ばれ、無容器での熱処理技術として有用な方法である。中谷らの実験では、宇宙で育成した結晶として世界最大のものが得られたばかりでなく、浮遊帯域の移動によって、InSbの純度が著しく向上するというおまけがあった。

定位置に浮かせることの難しさ

微小重力下では物体は空間に浮遊する。この特性は材料製造の研究の手段として魅力のあるものである。特に浮遊状態で固体を溶解凝固させるプロセスは無容器処理とよばれ、物体の純度を保ちながら熱処理できるので高純度材料の製造手段として魅力ある方法である。

溶解体を冷却すると、凝固が起こるとき核が発生して、微小な結晶が生成する。温度勾配をつけて非常にゆっくり融体を冷却すると、1つの核が成長して単結晶になるが、通常は沢山の小さな結晶の集合体である多結晶体になる。溶融体が浮遊状態にあると、凝固温度より冷却しても凝固の始まらない過冷却状態が実現する。核が発生しやすい壁面がないからである。そして、相当に冷却が進んでから、爆発的に結晶化が起きる。このようにして得られた固体の組織は通常が多結晶体とは異なっており、興味ある特性をもったものが得られることがある。したがって過冷却凝

固の実験手段としても、微小重力実験は有用な方法である。

FMP Tではイメージ炉の中でガラス球を浮遊凝固させる実験が行われた。炉内の試料を無接触で定位置に固定したり、移動させたりする必要がある。この実験装置の開発は大阪工業技術研究所の協力のもとに宇宙開発事業団が行った。製作を担当したのは石川島播磨重工（株）である。浮遊物体の位置制御は音波によって行われた。中央に40mmの透明石英ガラス管を置き0.96気圧のクリプトンガスを満たす。クリプトンは化学反応性の乏しい密度の大きな不活性ガスである。管の下部には超音波発信器が取り付けられている。発信された超音波は上部の反射板で反射する。周波数を適当に選ぶことによって、入射波と反射波の干渉による定在波（定常波）を形づくることができる。定在波の中に浮遊状態の試料を入れると、試料は音圧の最小の位置に落ち着く。これが音波による位置制御の原理である。

試料の加熱は光の集光によって行うことは既に述べた。定在音波のモードを乱さないためには、試料はなるべく小さく、球状の方が有利である。FMP Tでは直径10mmの球状ガラスが試料として使用された。最終的に選ばれた周波数は10-20kHzであり、周波数変動を自動的に行う制御システムをもっている。

本装置を操作させるうえで最も難しい点は、昇温に伴うガスの音速の変化にどう素早く対応するかである。浮遊試料を加熱すると試料に接触するガラスへの熱伝達によってガスの温度は上昇する。

FMP Tの音波浮遊炉にはもっと複雑な事情があった。透明なガラス試料にハロゲンランプからの放射光を集光させて加熱する場合、加熱効率が低く、規格の出力によって目的のガラスを溶融することができなかった。そこで、試料の周囲に白金線製のカゴを置いて加熱したところ、加熱された白金線から放射される赤外線によって試料が効果的に加熱されることがわかった。音場の中に直径10mmの試料ばかりではなく、ケージがあると、定在波のモードは乱れ、ケージからガスへの熱伝達によって、音速は不均一になり、さらに音波の乱れは大きくなる。ガスの温度上昇を抑えるためにガスは封じ込めないで流された。

FMP Tでは合計3回の浮遊溶融実験が行われた。1回目は低融点ガラス、2、3回目は溶融温度1,300℃の高融点ガラスについての実験が行われた。特に3回目の実験では浮遊状態で粉体原料が完全に溶融して透明なガラスが得られている。

3回目の実験を詳しくみると、1,000℃以上の高温状態でガラス原料球は不規則な振動を始め、溶融の後に白金ケージに付着した。この実験の完全な成功のためには、溶融後一定の時間を保った後で、徐々に冷却してガラスを固化してから、ケージに軟着させることが必要である。今後の努力によって、1,300℃での溶融状態での試料の位置制御が可能になるであろう。

難焼結性材料粉末の固化

ここで、話題をガラリと変えて、衝撃超高圧力を利用した難焼結性材料の開発について述べよう。

物質の高温強さや融点は原子同士を結びつけている化学結合の程度による。一般にイオン結合や金属結合に比べて共有性物質中の原子間の結合エネルギーは大きく、高融点になる。特に物質を構成する原子の質量が小さいものほど結合力が大きく、耐熱性が高い。その代表がケイ素と炭素が化合したSiCであり、窒素と化合したSi₃N₄である。炭素同士がsp³と呼ばれる強い共有結合で結ばれたものがダイヤモンドであり、その強い結合故に最も硬く、最も良く熱を伝える。ところがダイヤモンドは大気圧力下では不安定で1,000℃以上では黒鉛に転換するので高温材料に分類することができないが、高圧力下では非常に高い融点を持っている。炭素の大気圧力下で安定な相は黒鉛である。

ダイヤモンドの構造用材料としての欠点は脆く、へき解しやすいことである。それは、sp³共有結合が異方的であるために、特定の方向〈111〉の圧縮には非常に強いが、これと直角方向の力を受けると結合が簡単に切れてしまう。これがへき解しやすい理由でもある。一般に共有結合性の耐熱材料がもろく、硬いのはこのことに対応している。

合金の耐熱性を高める一つの方法は金属間化合物化することである。単純な合金に比べ、金属間化合物の耐熱性はどうしても高いのだろうか。その秘密は金属結合が主役だった合金の中に、共有性結合が生じるからである。この程度が強くなると、合金は硬く、脆くなり、靱性は低下する。

セラミックスの一般的な製造法は粉体原料を焼結によって焼き固めるものである。粉末粒子同士が結合したり、粒成長が進行するためには、粒をつくっている原子が移動する必要がある。この動きが拡散である。共有結合性が強いと拡散係数が小さく、焼結が難しくなる。SiCとSi₃N₄は代表的な難焼結性物質であり、通常の方法では結合材を加えることなくこれらの粉末を焼結することができない。ダイヤモンドはもっと焼結が難しく、安定な超高圧力下で、ダイヤモンド粉末を融点の70%の温度に加熱しても、粒同士の結合がほとんど起こらない。

ダイヤモンド粒同士の接合が困難なのは、拡散係数が小さいばかりでなく、異方性が大きいことによる。粉末粒子の結晶軸の方向が一致しないと、粒間における共有性結合の形成が難しいからである。

ダイナミックスコンパクション

粉体を強い衝撃波によって強引に固化させる方法がダイナミックコンパクション(Dynamic Compaction)である。金型の中に原料粉末を入れ、パンチを重いハンマーで叩く方法もダイナミックスコンパクションの一種である。通常1トンのハンマーを秒速数・10mでパンチに衝突させて、静的な方法によって得ることの難しい、難

焼結性セラミックスや複合材料の高密度圧粉体を製造することができる。この場合の高密度とは75-85%の密度を指す。この高速ハンマーによるダイナミックコンパクションによって得られた圧粉体は、次に通常の熱処理によって焼結を行う。この方法の欠点は、得られる圧粉体の大きさにくらべ装置が大がかりであり、騒音と振動を伴うので製造装置として余り普及することはなかった。現在では、この方法は特殊な研究目的に使われているだけである。

次に衝撃波によるダイナミックスコンパクションについて述べよう。粉体に強い衝撃波を通過させる時、極めて短時間であるが粉体中に高い圧力と同時に高温度が発生する。そこでは、粉体の温度が均一に上昇するのではなく、粉末粒子の表面が選択的に発熱する。これは粉体や多孔質体の衝撃圧縮時に見られる特異な現象である。

このような不均一な熱の分布は、拡散によって緩和される。緩和時間は材料によって異なり、高熱伝導率をもつ金属材料で10~100ns、つまり、衝撃波面内またはその付近で高温領域は急冷、緩和される。この現象を利用してアモルファス金属の衝撃固化を行うことができる。

セラミックス材料では一般に熱伝導率は低く、1~10 μ sの緩和時間が必要であり、衝撃波通過後も不均一な温度分布が残ることがある。

衝撃圧縮によって、粉末粒子の表面を選択的に、粉末の結合に必要な温度に加熱することができ、しかも、短時間の内にその材料持つ特性が失われない温度まで急速に冷却できる。この特長を利用した粉体の固化技術の研究が世界各国で行われている。しかし、現在のダイナミックコンパクション技術では高密度に固化された部材のクラック発生が解決できなく、実用化に足踏みしているのが実状である。

筆者は現在、クラックの入らない大きな岩盤掘削用ダイヤモンドビットを目指したダイナミックコンパクションの研究を行っており、このことについても講演において述べたい。

4. 研究成果報告

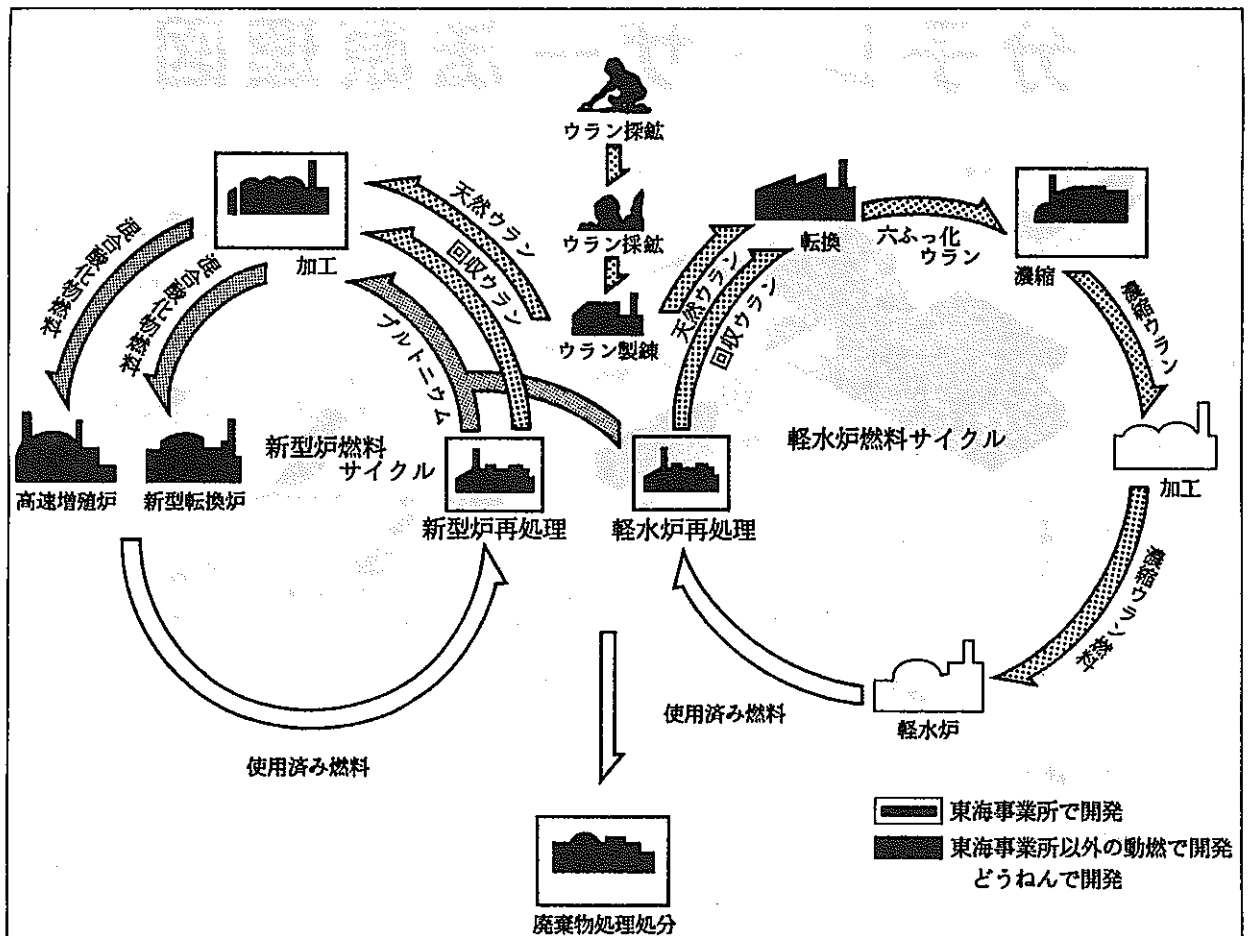
(1) レーザー同位体分離技術

レーザー同位体分離技術

—物質の極限分離への応用—

東海事業所 核燃料技術開発部
 新型濃縮技術開発室

須藤 収



レーザー同位体分離技術の 核燃料サイクルへの応用

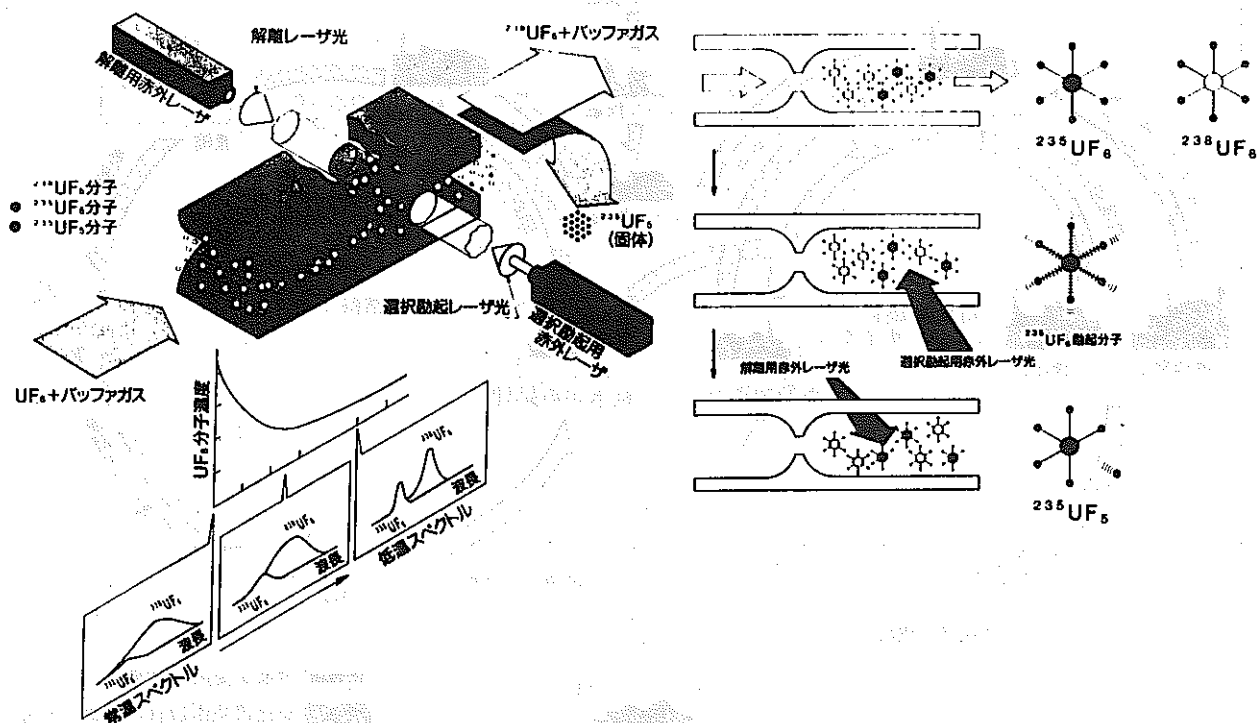
・ウラン濃縮 ➡ 分子レーザー法ウラン濃縮

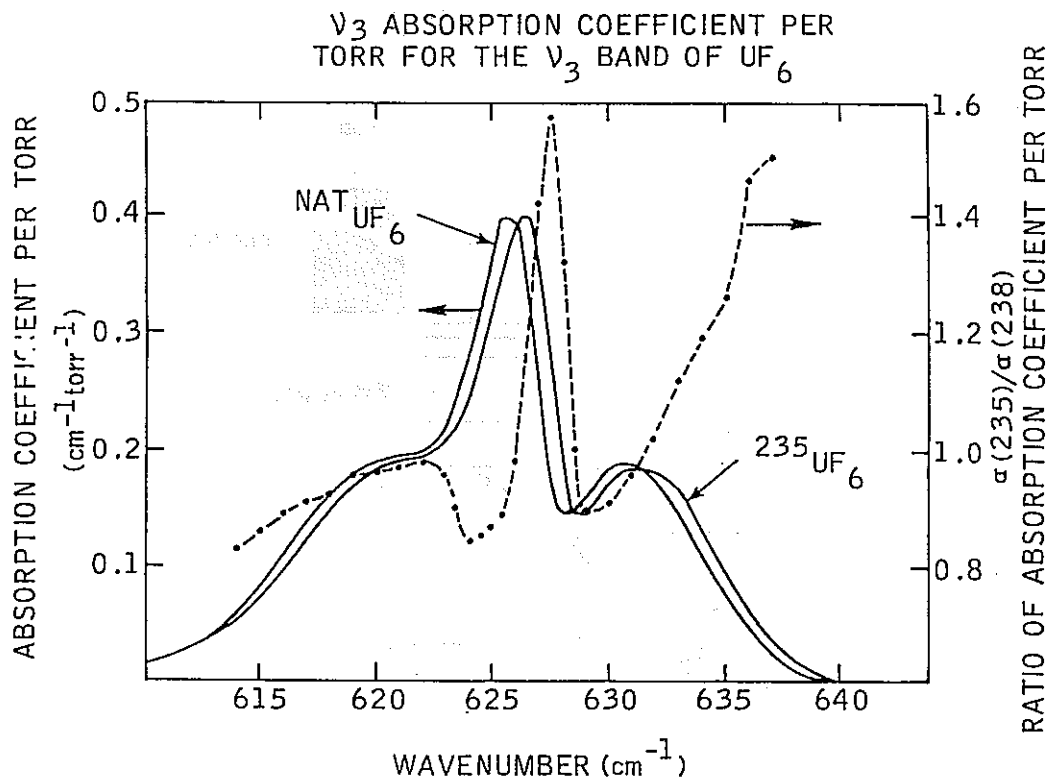
・放射性同位体の分離・除去

➡ 再処理工程から発生する $^{14}\text{C}\text{O}_2$ の分離

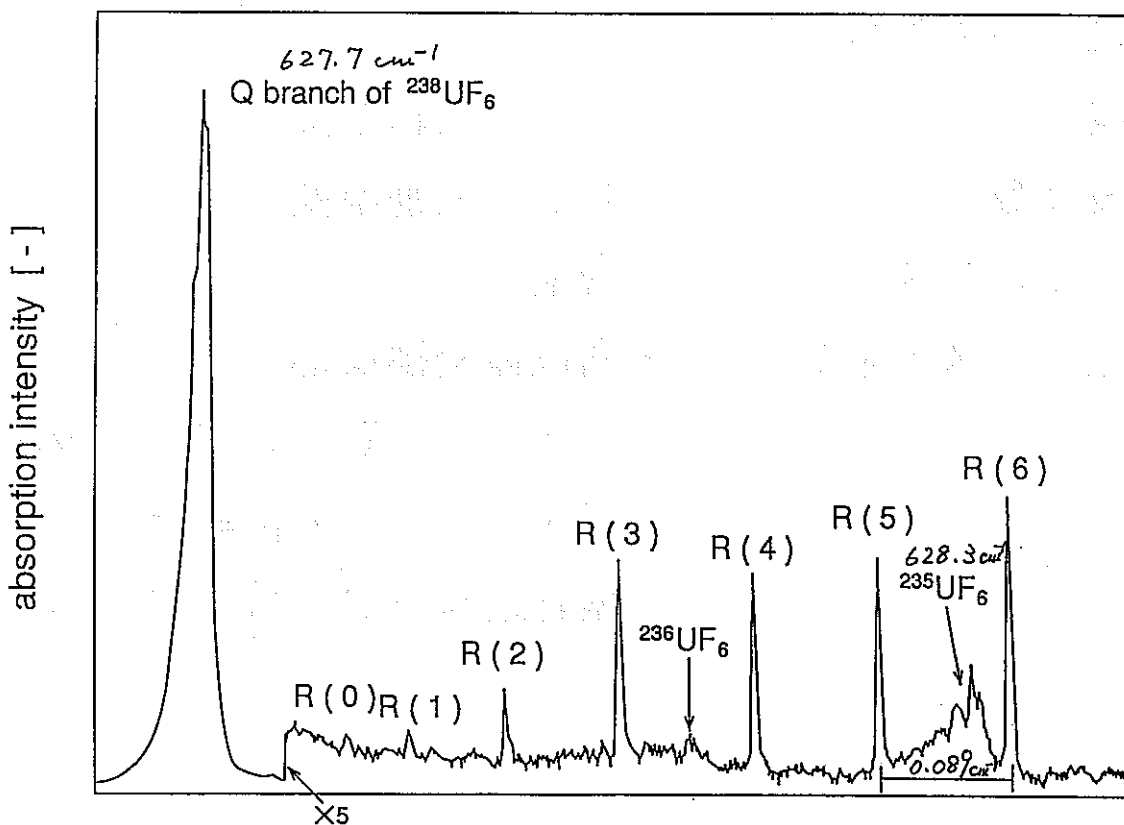
➡ 再処理不溶解残渣中の有用金属
パラジウムの中の ^{107}Pd の分離

分子レーザー法原理図



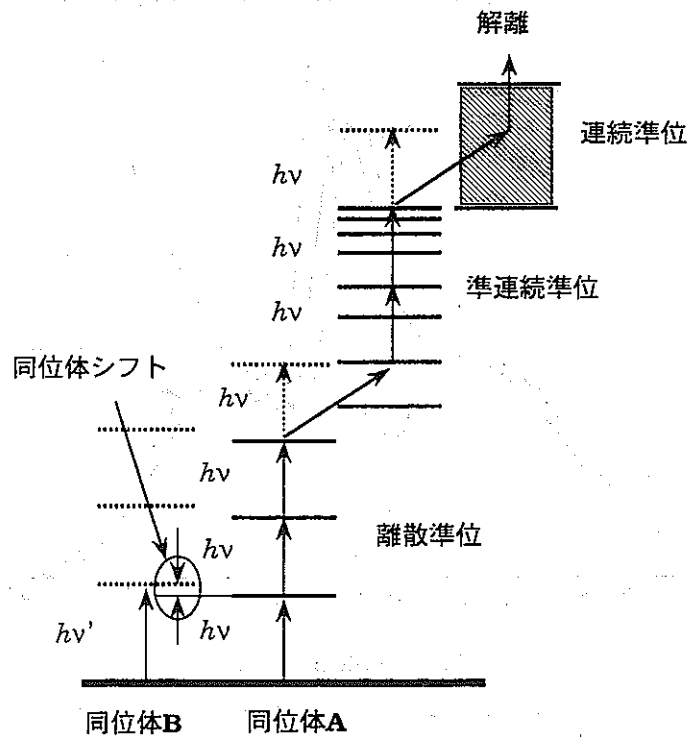


Measurement of the absorption coefficient per torr for the ν_3 fundamental of UF_6 .



Diode laser absorption scan in the region of the ν_3 Q branch of UF_6 .

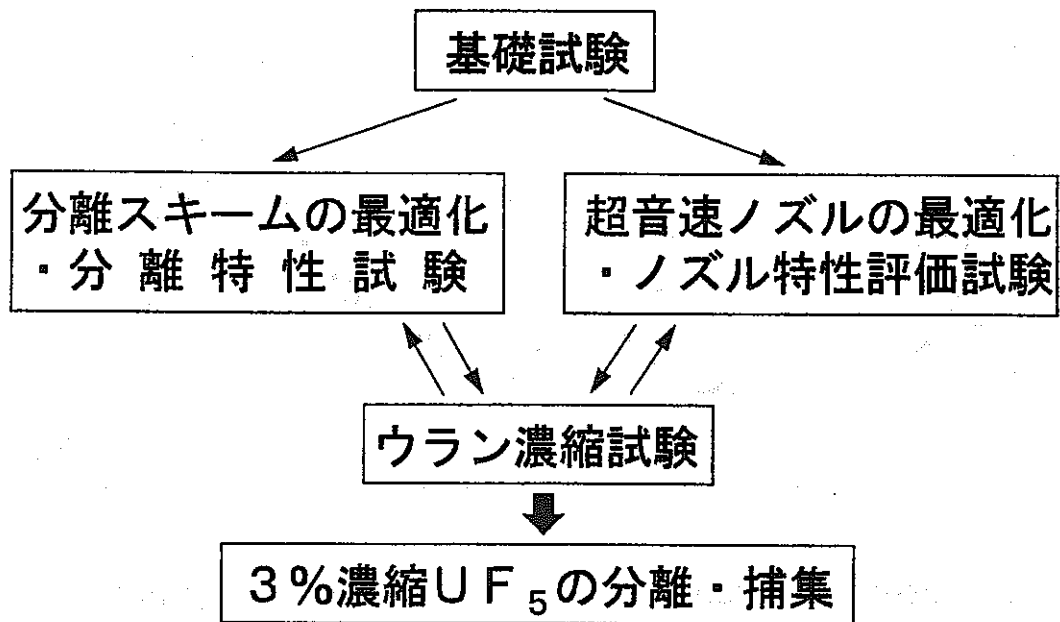
赤外多光子解離反応



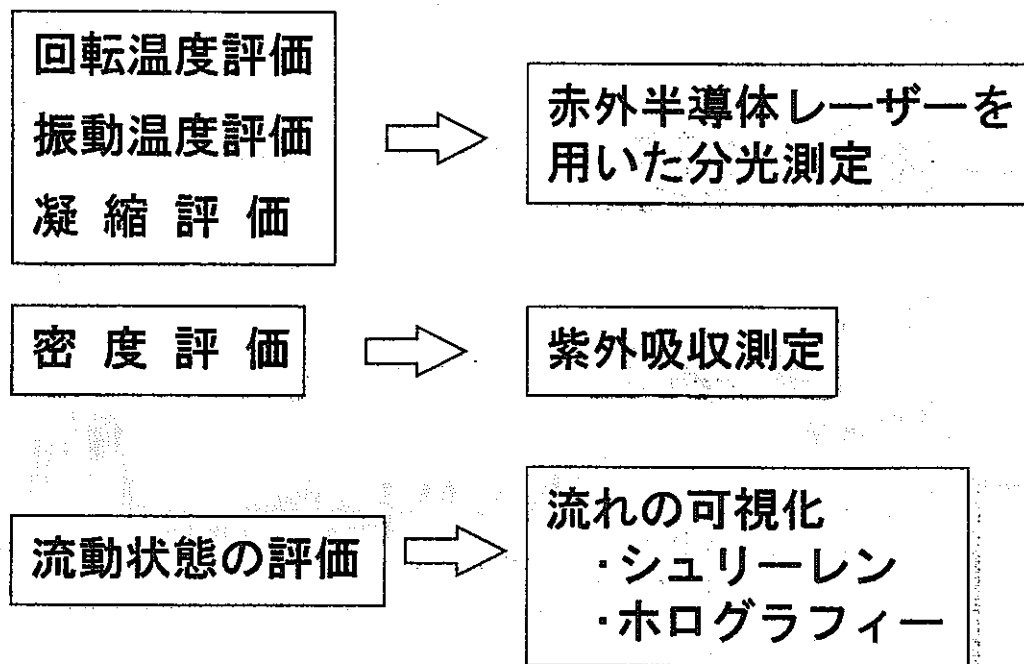
分離特性に影響を与える因子

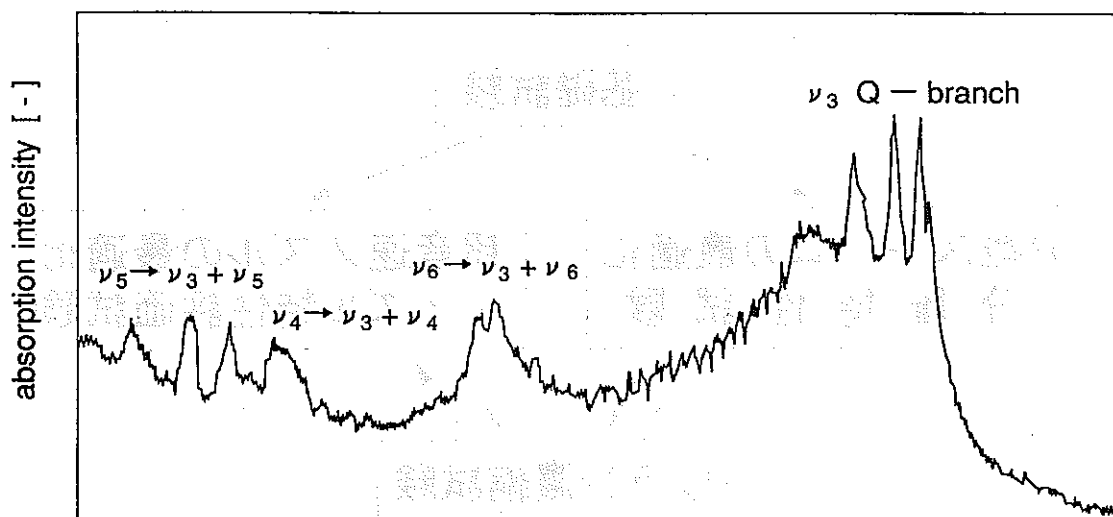
- 波長
- 波長数
- フルエンス
- 光パルスディレイ
- UF_6 回転温度
- UF_6 振動温度
- 凝縮
- 同位体交換反応
- UF_5 への UF_6 ガスの吸着
- UF_5 と F との再結合
- 振動励起 UF_6 分子の緩和

工学試験の進め方

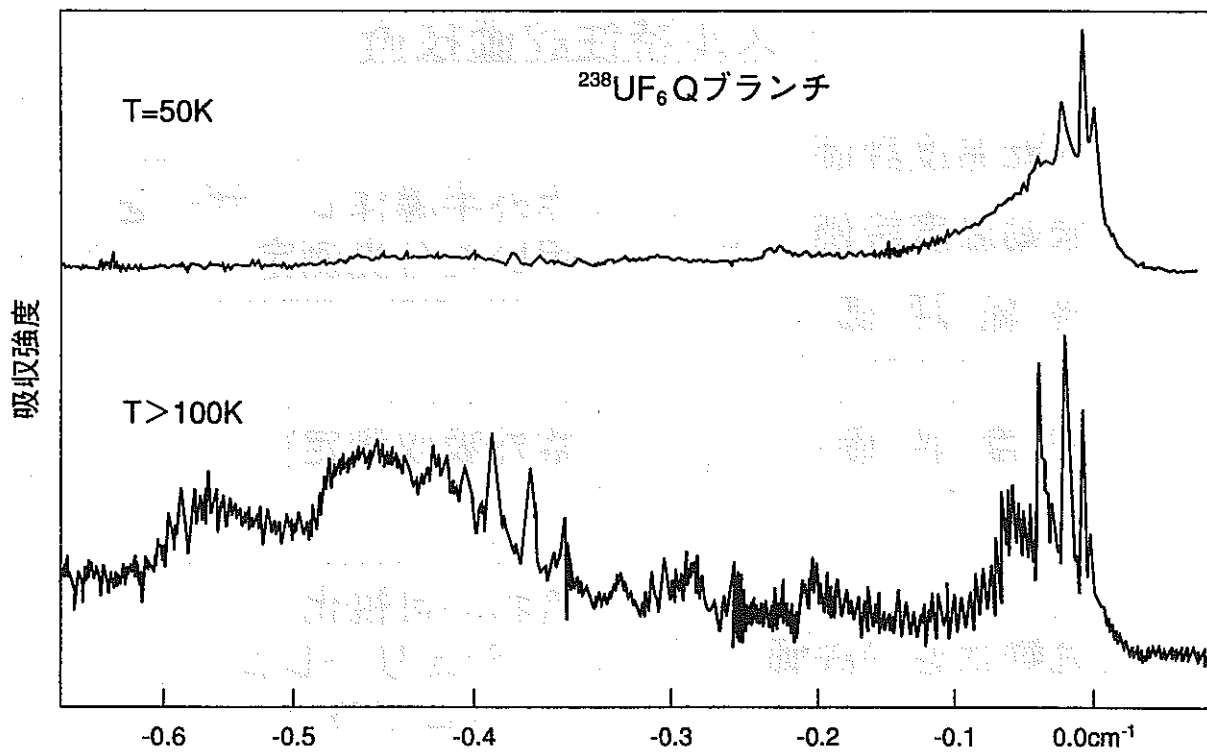


ノズル特性評価技術

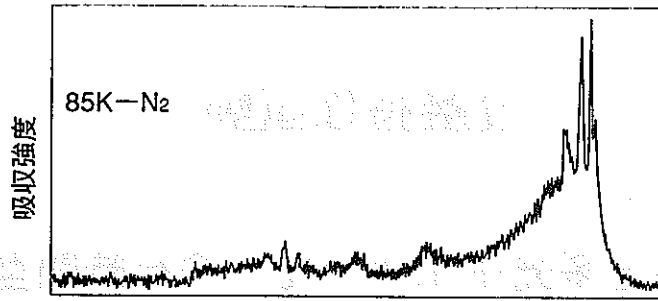




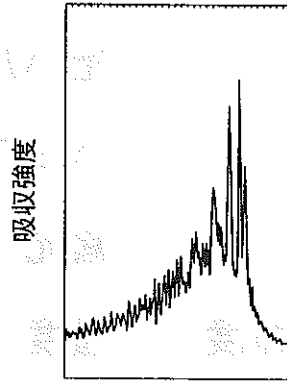
Diode laser absorption scan in the region of the ν_3 Q branch of UF_6 .



$^{238}\text{UF}_6$ の高分解能赤外吸収スペクトル

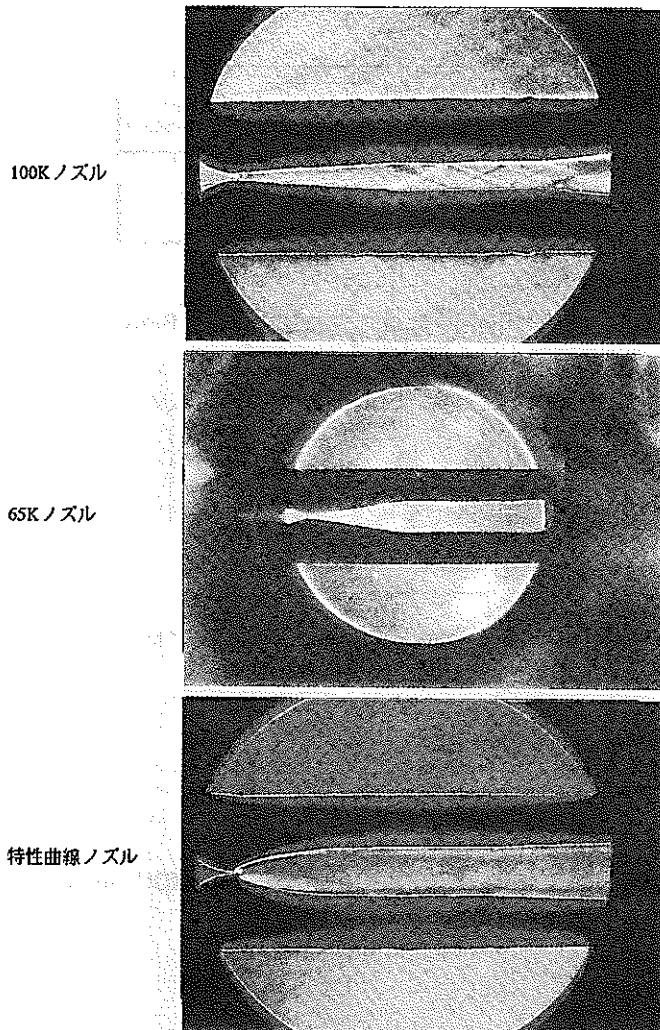


測定スペクトル



シュミレーション (90K)

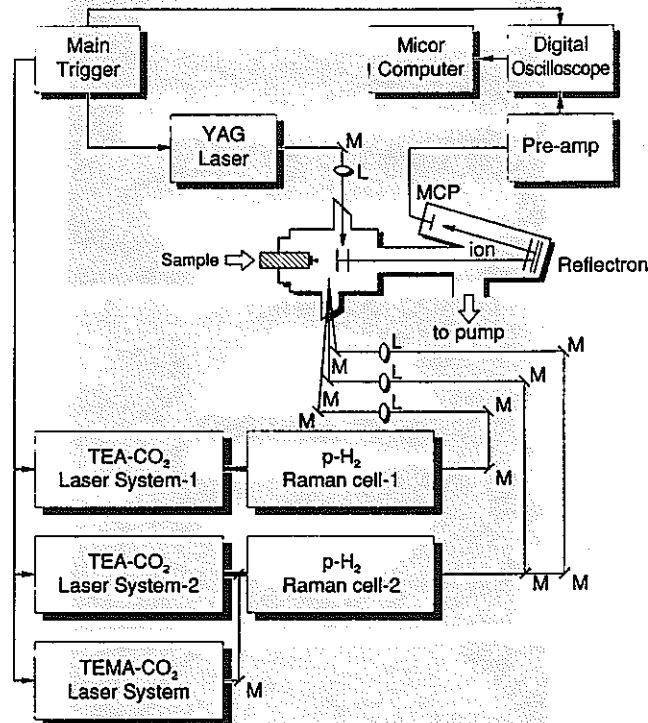
赤外吸収スペクトルからの回転温度の推定



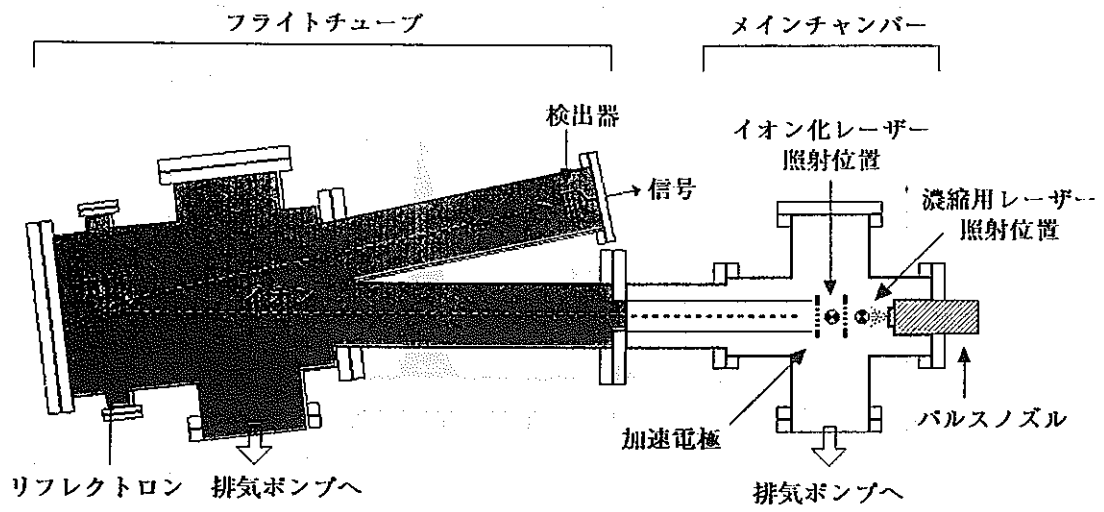
分離特性試験

分子線と多光子イオン光／飛行時間型質量分析計をもちいたパラメータ試験

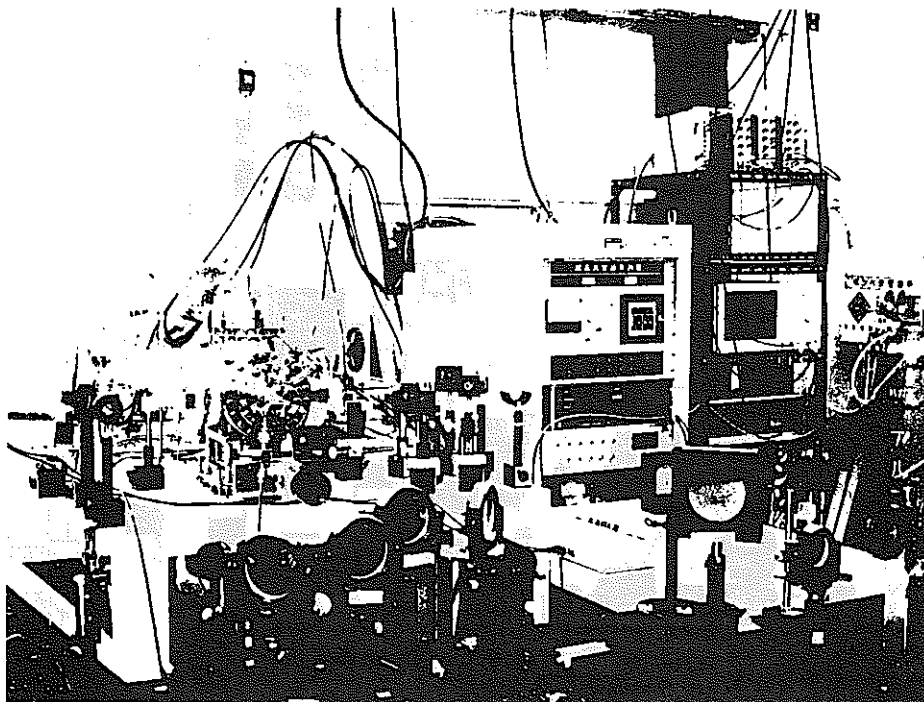
- ・波長
- ・波長数
- ・線幅
- ・エネルギー強度
- ・光パルスディレー
- ・パルス形状
- ・偏光
- ・温度



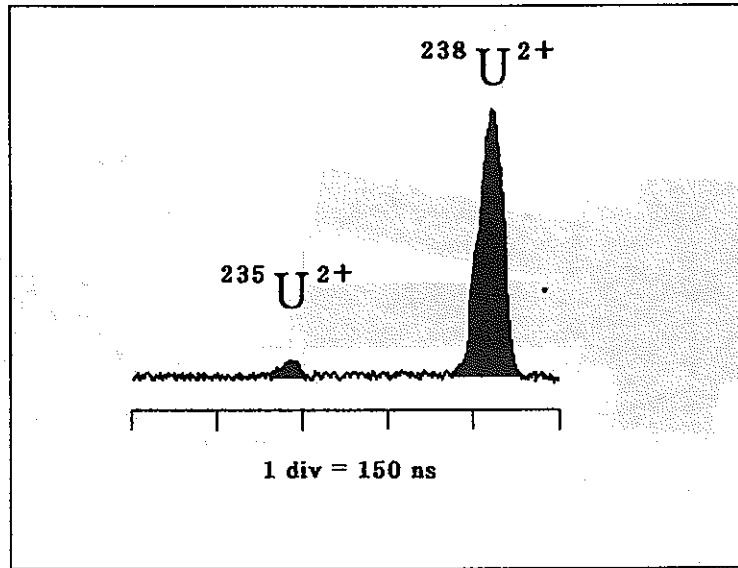
Schematic diagram of molecular beam experiments



MP I / T O F M S による分離特性の測定図



2017年10月27日 2017年10月27日



UF₆のTOFマススペクトル

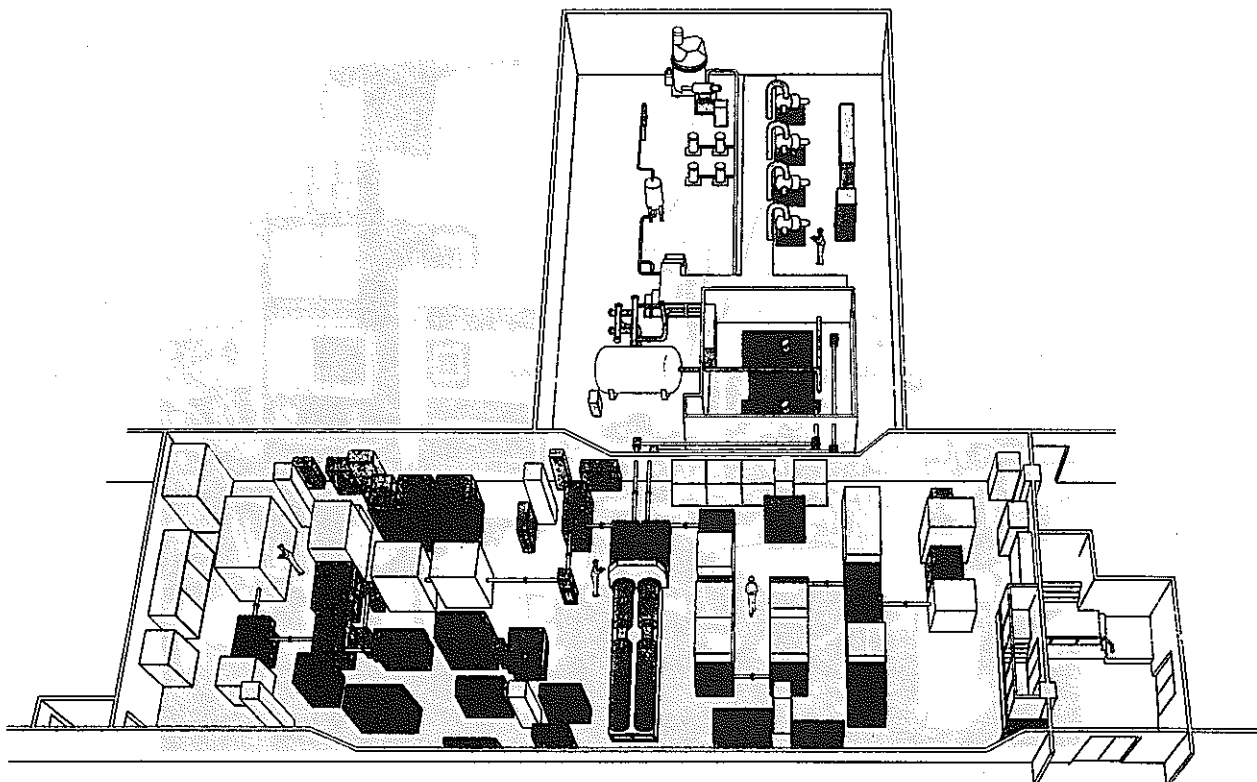


Illustration of MLIS Test Facilities

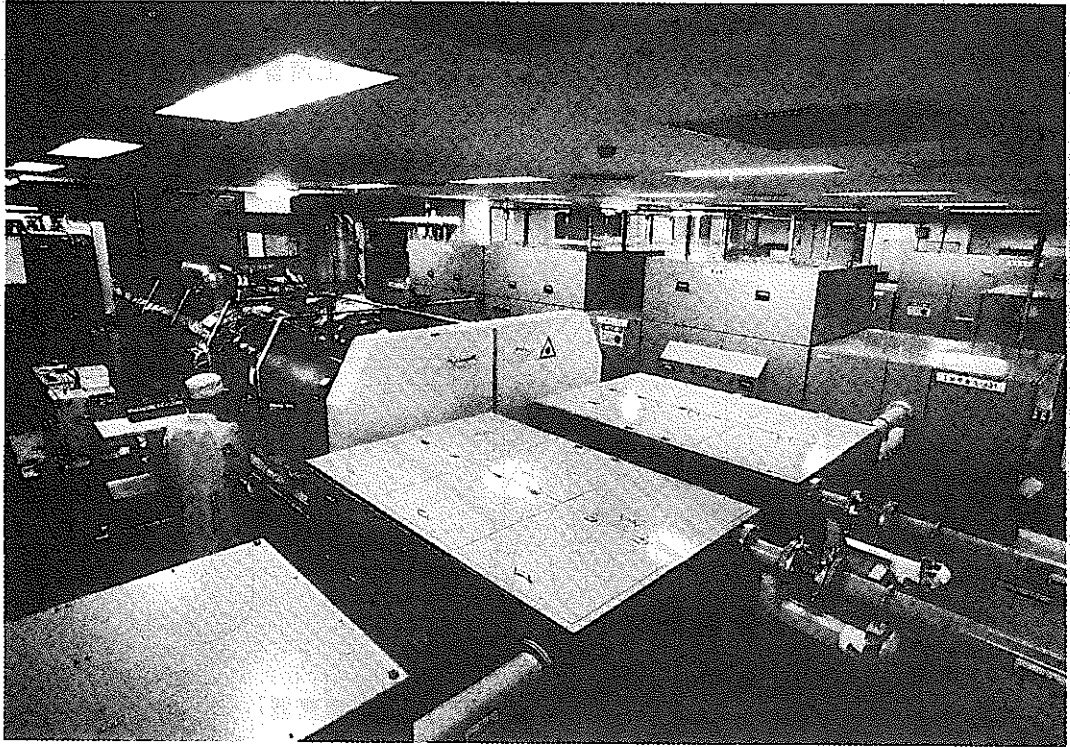


图 1-1-1 工业机器人控制室

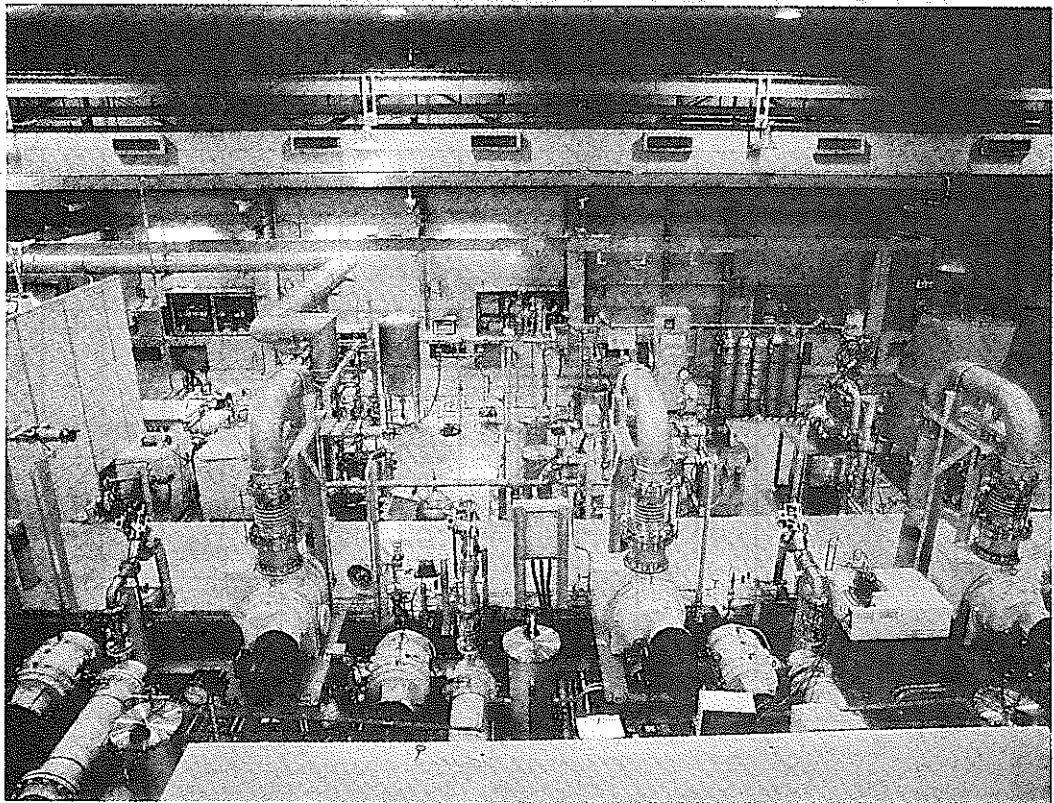
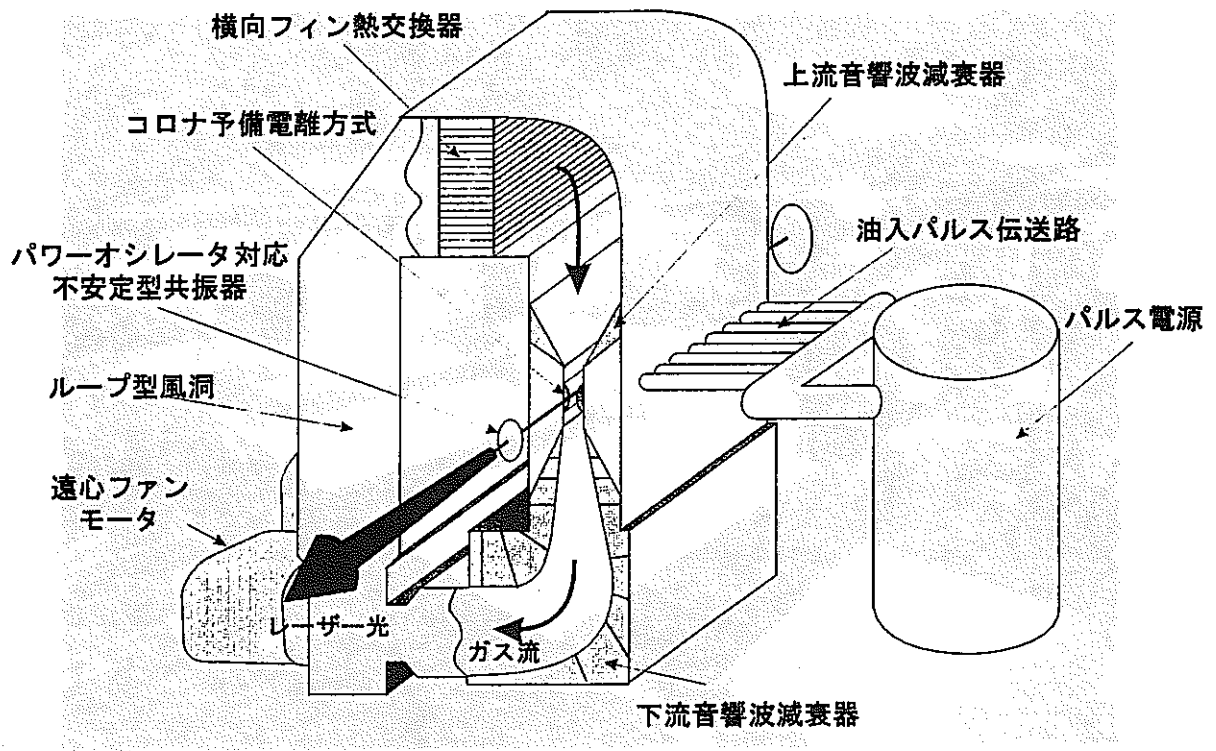


图 1-1-2 工业机器人工作现场



1kHz炭酸ガスレーザー概念図

分子レーザー法ウラン濃縮技術開発スケジュール

	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	2000
基礎研究					C&R								C&R
工学試験装置の建設													
工学試験				第Ⅰ期工学試験									
				2波長ウラン濃縮試験									
								第Ⅱ期工学試験					
								分製特性試験					
								3波長ウラン濃縮試験Ⅰ					
									3波長ウラン濃縮試験Ⅱ				
								超音速ノズルの最適化					
レーザー開発								kHzレーザー開発					
プラント設計研究													
応用研究													

放射性核種の生成量

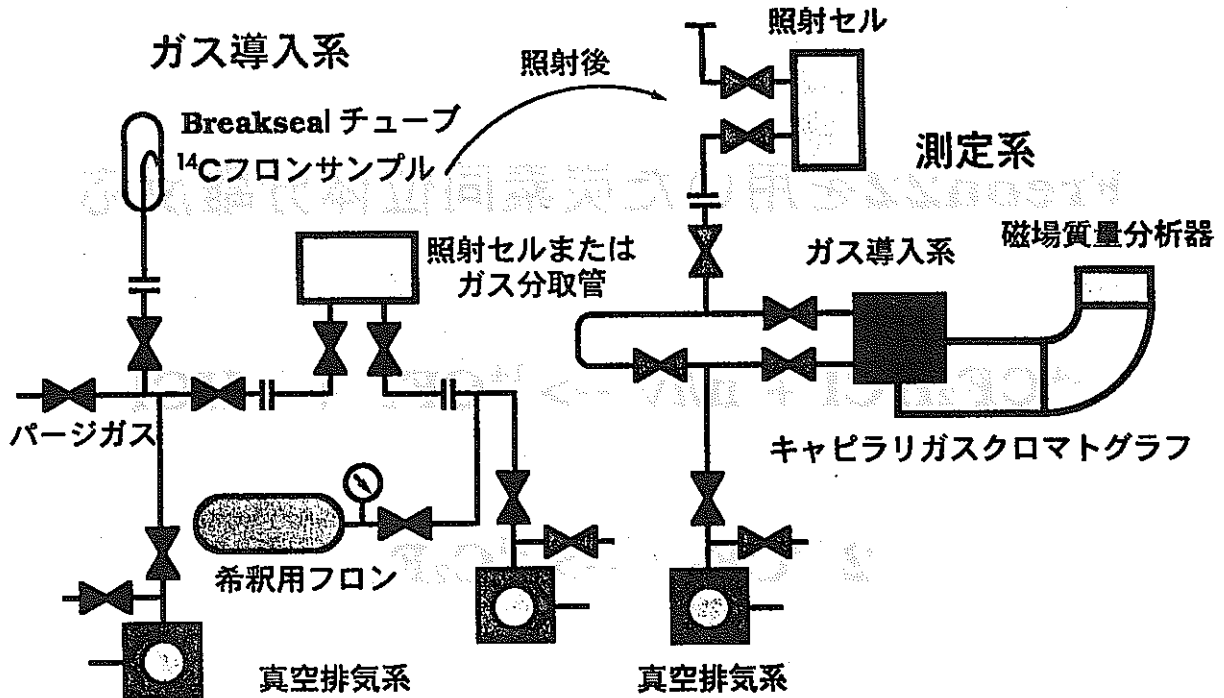
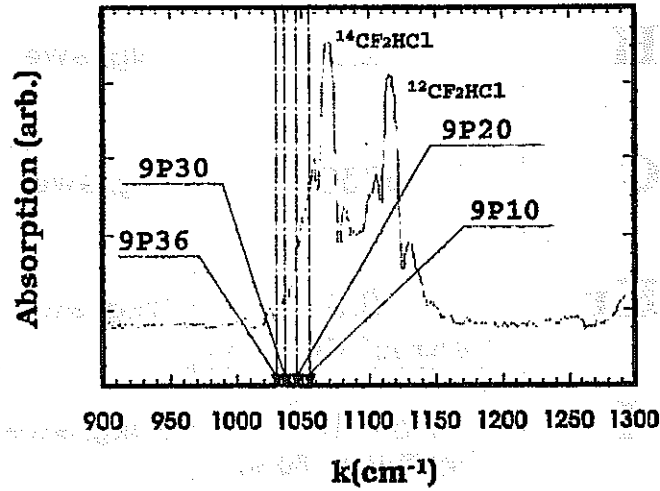
核種	半減期(Year)	生成量
^3H	12.3	1.4g/GWe・yr
^{14}C	5730	4.1g/GWe・yr
^{85}Kr	10.8 (全Kr量; ^{85}Kr ~ 7%)	12kg/GWe・yr
^{129}I	1.6×10^7 (全I量; ^{129}I ~ 80%)	7.4kg/GWe・yr

※1GWe・yrは、約30t(U)の使用済み燃料(燃焼度37,000Mwd/t)を発生

Freon22を用いた炭素同位体分離反応



吸収スペクトルと照射レーザーライン



試料ガス分取系および測定装置概略図

¹⁴C分離効率

照射レーザーライン	解離率(%)	分離係数
9P36(1031.46cm ⁻¹)	0.43	1370
9P30(1037.45cm ⁻¹)	0.75	366
9P20(1046.90cm ⁻¹)	1.60	284

セル封入圧力 70Torr
照射フルエンス 3J/cm²

- 使用済み燃料 1 トン当り約 3 kg の
白金族元素 (Ru, Pd, Rh)

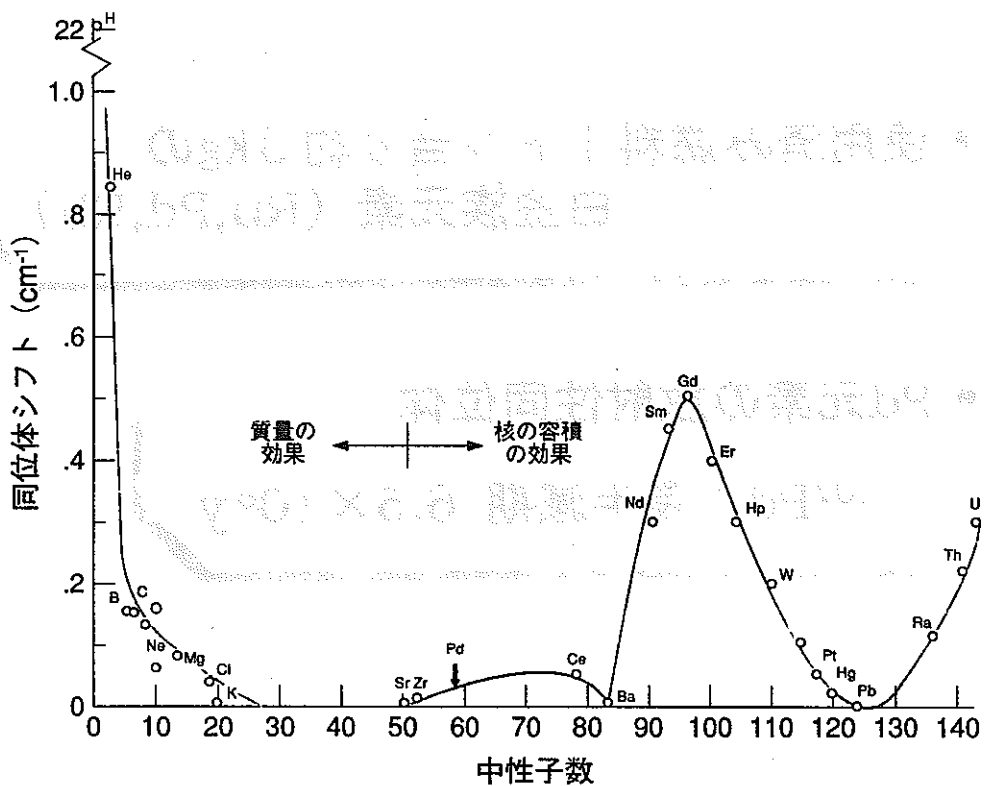
- Pd元素の放射性同位体

¹⁰⁷Pd : 長半減期 6.5 × 10⁶ y

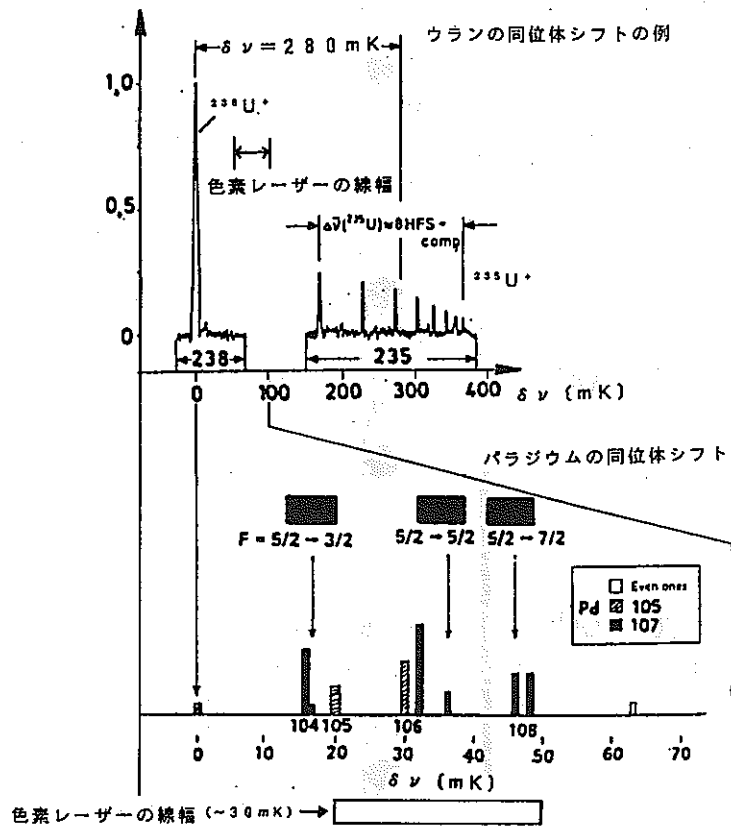
Ru-101 34%	Ru-102 34%	Ru-103 ~700 PPM ~0.1 Y	Ru-104 24%	Ru-106 5% ~1 Y	
Rh-102 ~150 PPM ~0.5 Y	Rh-102m ~250 PPM ~3 Y	Rh-103 ~100%			
Pd-104 19%	Pd-105 23%	Pd-106 26%	Pd-107 18% 6.5x10 ⁶ Y	Pd-108 12%	Pd-110 3%
Kr-83 11%	Kr-84 30%	Kr-85 8% 10.7 Y	Kr-86 51%		
Sr-88 45%	Sr-90 55% 28 Y				
Cs-133 38%	Cs-134 5% 2 Y	Cs-135 12% ~10 ⁶ Y	Cs-137 45% 30 Y		
Pm-146 ≦ 1% ~2 Y	Pm-147 ~100% 2.6 Y				

J. W. Dubrin, LLNL

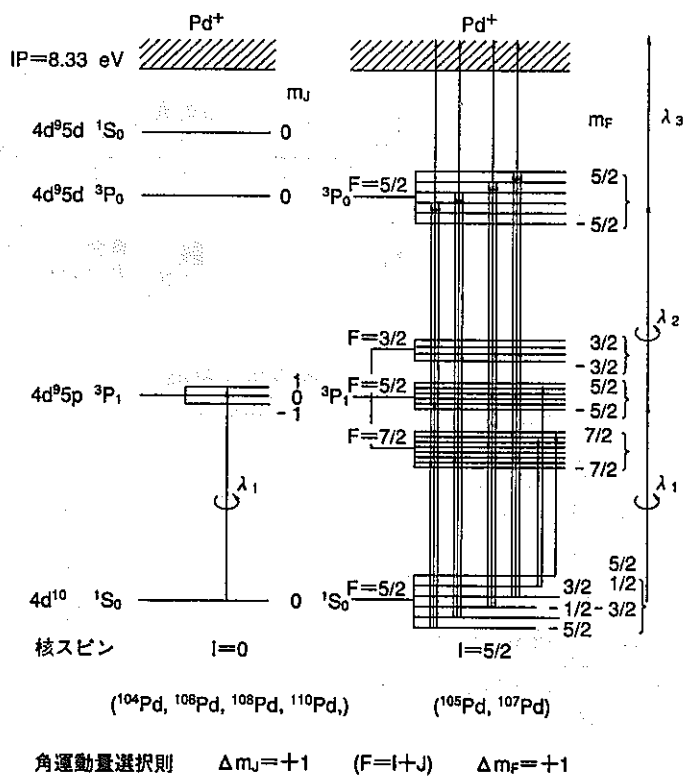
Isotope abundances and half-lives



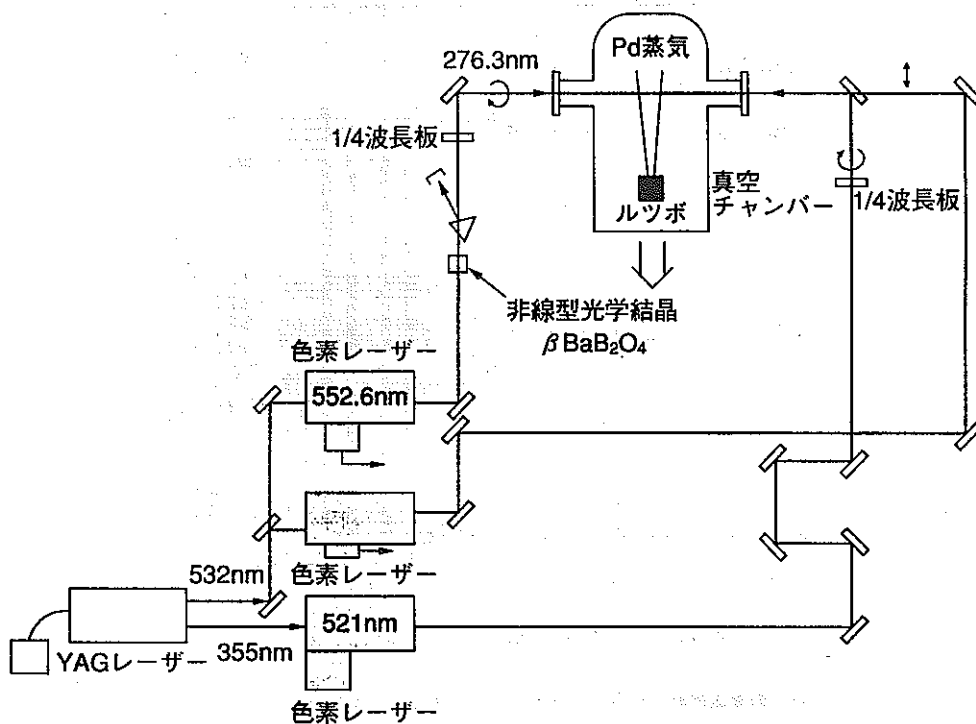
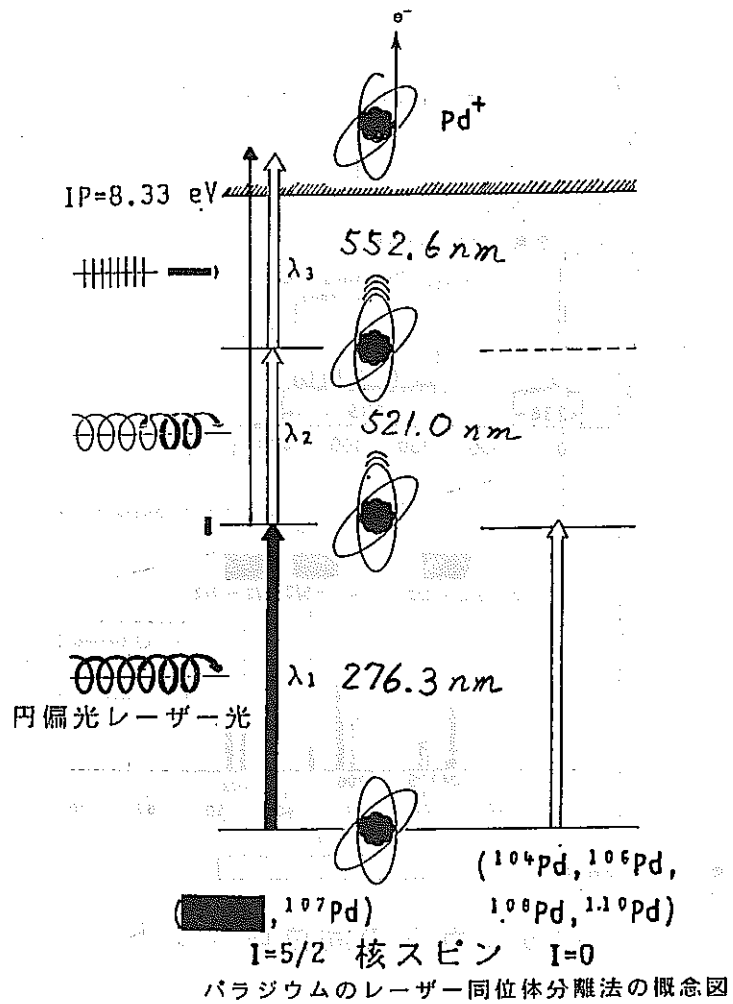
同位体シフトと中性子数の関係 [R.C.Stern et al.]



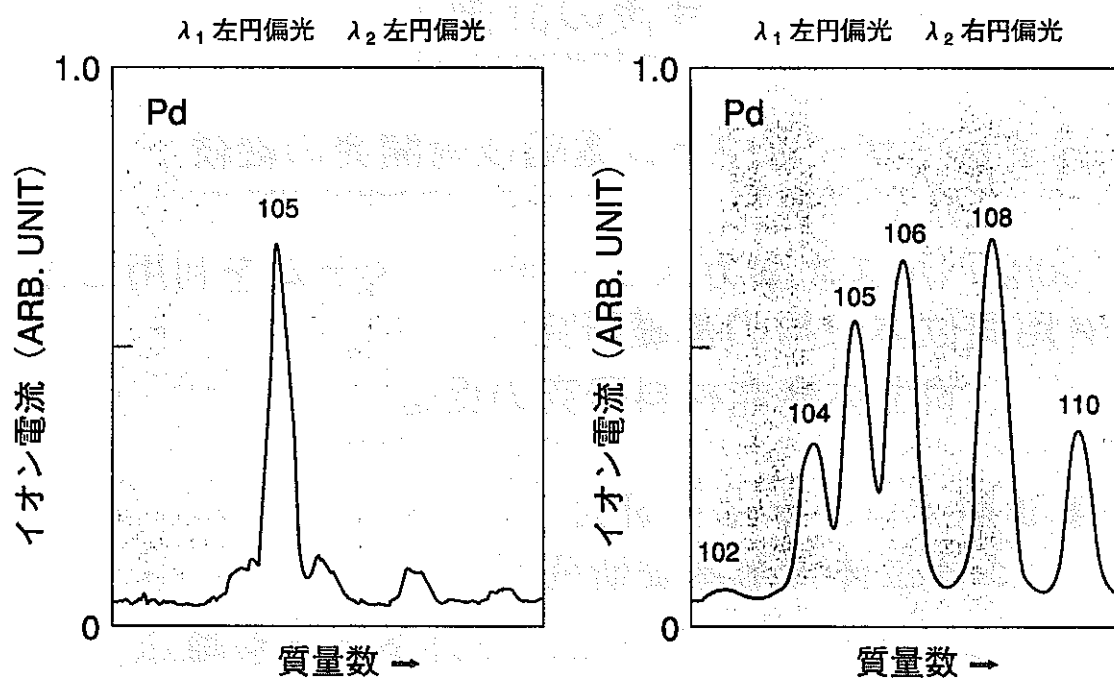
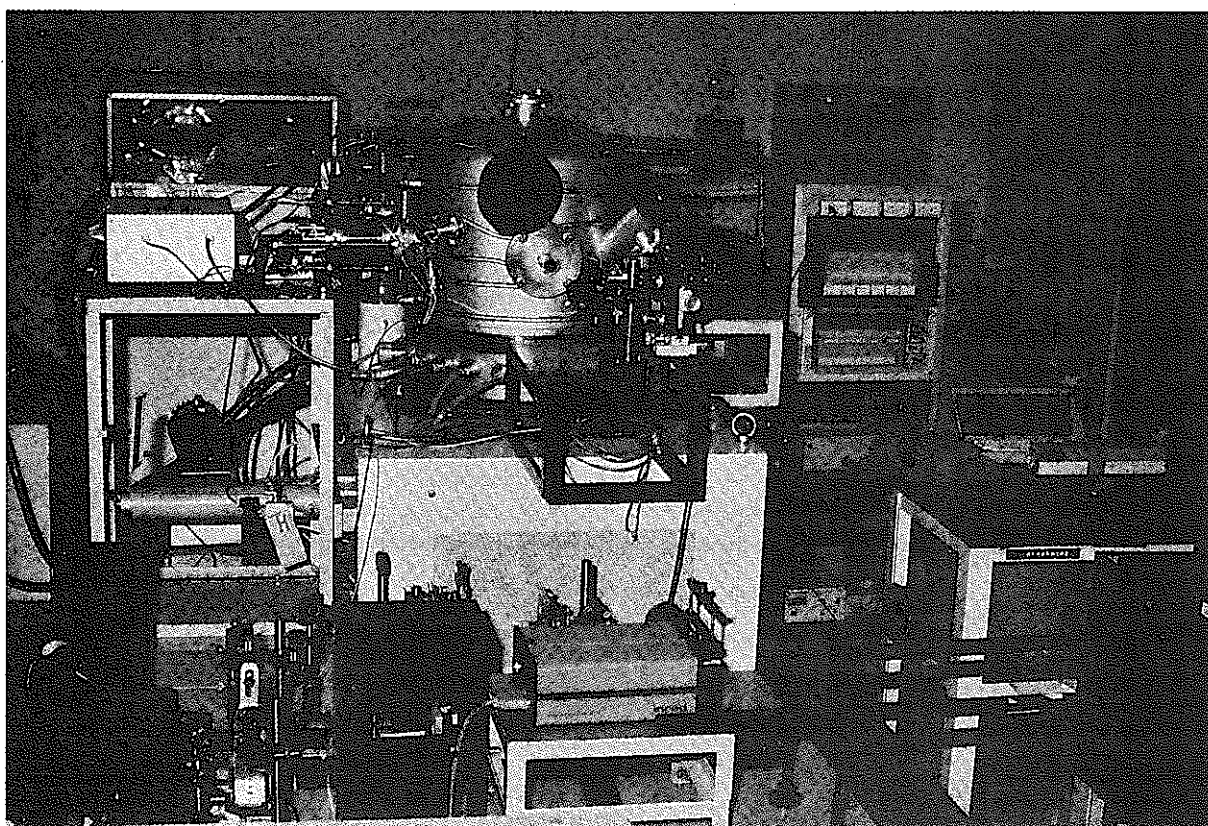
パラジウムの同位体シフト



パラジウムのエネルギーレベルダイアグラム



実験装置の概要



円偏光レーザーによる同位体選択性

- ^{105}Pd を22%から約73%に濃縮

- 応用の可能性のある元素

Mg , Ca , Zn , Sr , Cd , Ba , Hg , Yb , C , Si

Ge , Sn , Pb , Pu

今後の計画

- 分子レーザー法ウラン濃縮技術開発の継続
- 100Hzパルス炭酸ガスレーザーシステムを利用した有用同位体分離の基礎研究
 - ・ 同位体機能材料研究の促進
- 第Ⅱ期フロンティア研究
 ^{15}N 同位体分離基礎研究
レーザードリフト法、赤外多光子解離法

(2) 光溶液化学の研究

② 光溶液化学の研究

—光で制御する溶液反応—

東海事業所 核燃料技術開発室 先端技術開発室
和田 幸男

目的

- ・ 光の量子効果により溶液中の溶存元素を光励起し、選択的な化学反応を発生させたり、化学反応を促進させる等により、目的とする反応を任意に制御する技術の研究。
- ・ 光化学反応の核燃料サイクル技術への応用に関する研究。



光化学的なPuとNpの
分離および共抽出

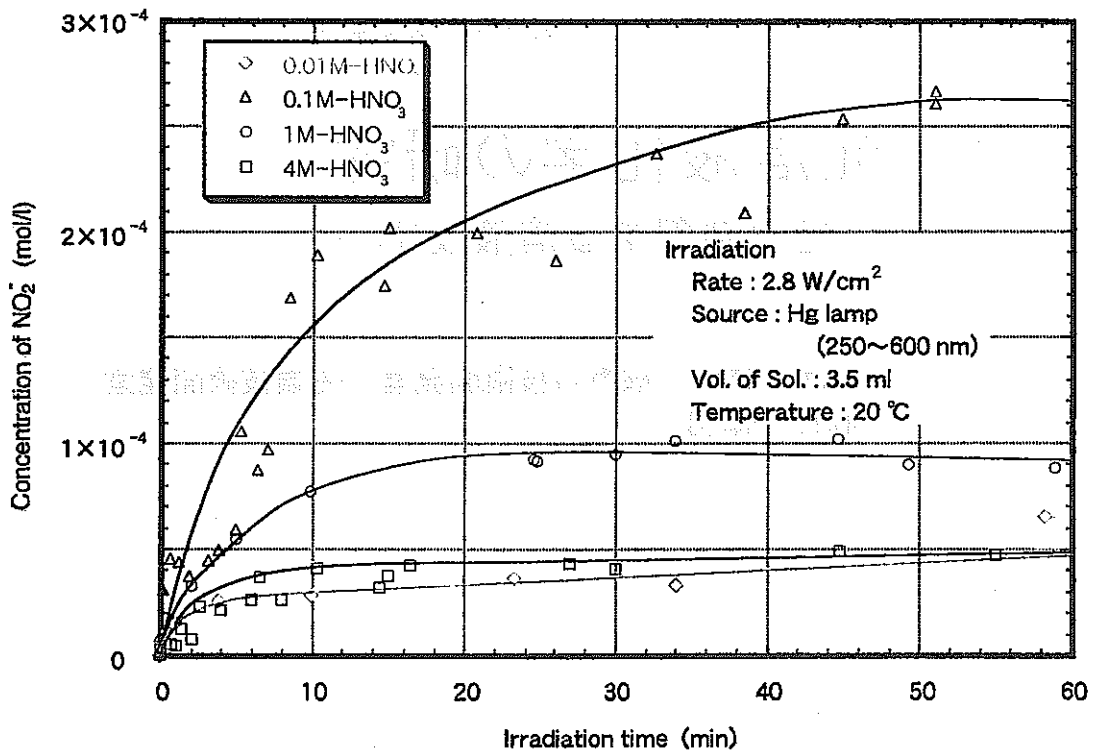


図1 硝酸濃度と光分解生成物の亜硝酸生成量との関係

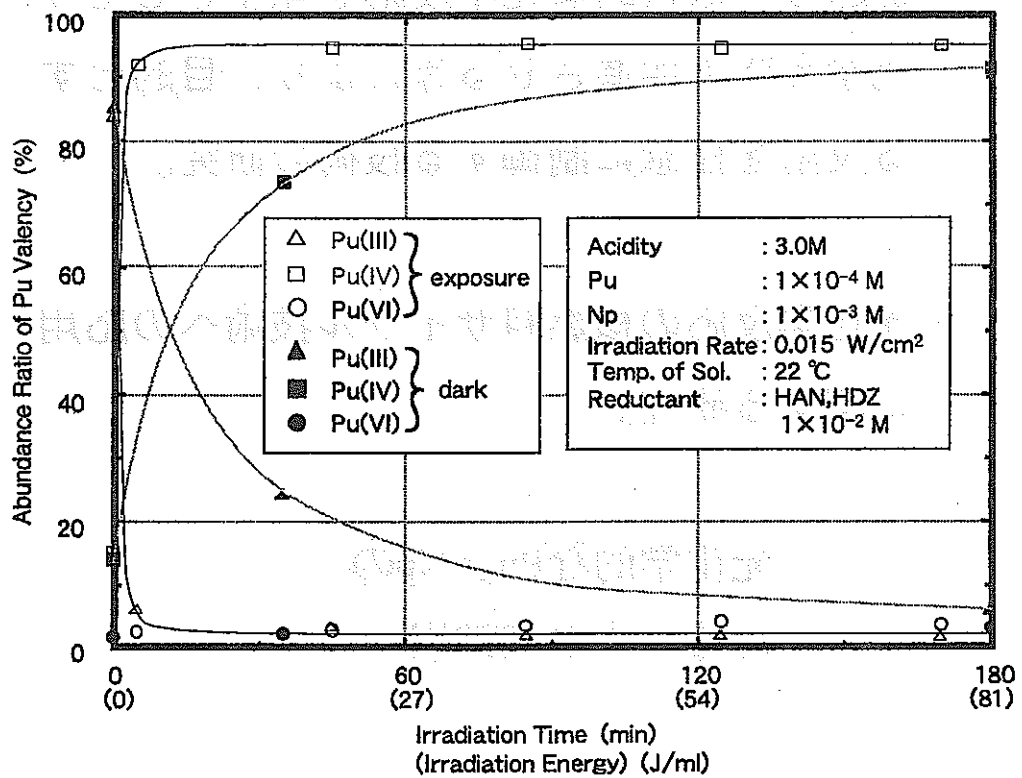


図3 光照射によるPu原子価の酸化還元反応挙動

硝酸の光化学分解は硝酸濃度に比例しない。

↓

× ⇒ 従来言われている光化学反応 ⇒ ?

↑ メカニズムでない

Pu(III)の光化学酸化速度は硝酸濃度に比例する。

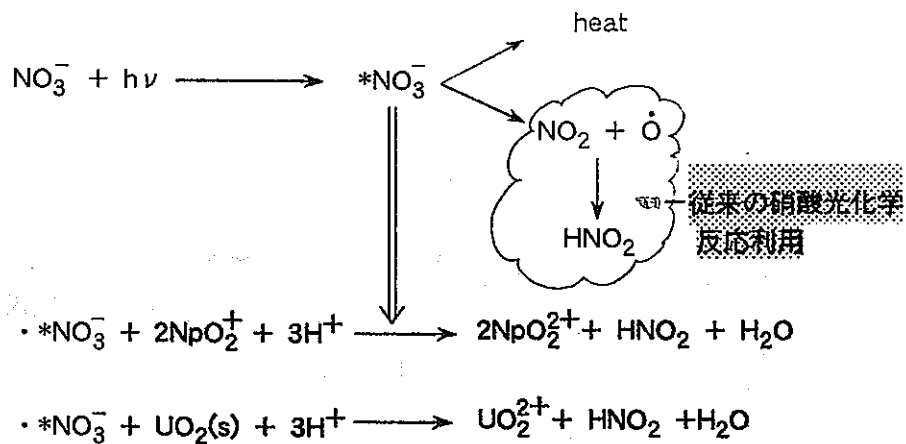





図2 光励起硝酸、*NO₃⁻による光化学反応概念

光励起と酸化還元特性

$h\nu(\Delta E)$

 : 分子を光励起すると1個の電子が励起エネルギー ΔE だけ高い軌道に移る。

* 
 : 励起分子の寿命は普通1nsより長い。

周囲の溶媒分子の配向や分極はほぼ1~10ps以内に平衡に達する。


 : M^* についても基底状態の分子と同様に熱力学的酸化還元電極電位を考えることができる。

$${}^0E(*M/M^+) = {}^0E(M/M^+) - \Delta E/e$$

$${}^0E(-M/M^*) = {}^0E(M^-/M) + \Delta E/e$$

- つまり, 電位差 $\Delta E/e$ だけ, M^* は M より卑な電位で酸化され, 貴な電位で還元される。
- 基底状態では起こらない電子授受反応 (酸化還元反応) を駆動することができる。

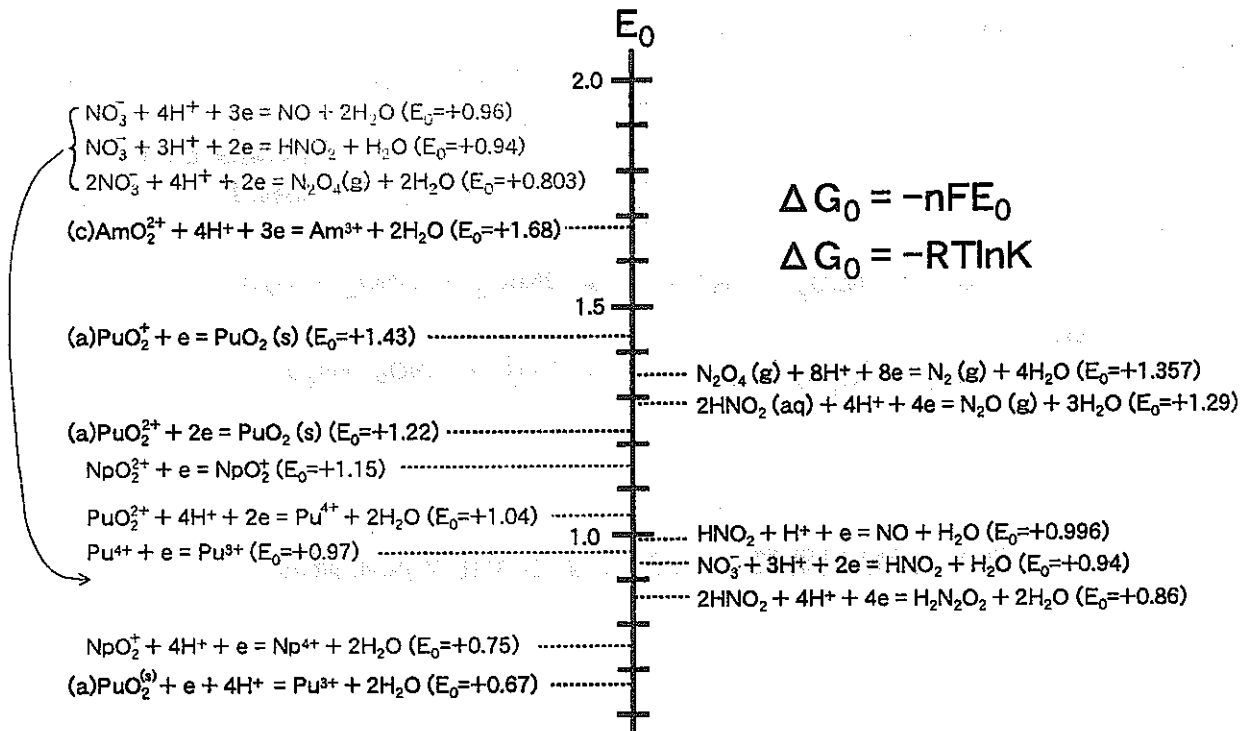


図4 硝酸溶液中における各種元素の各化学形における標準酸化還元電極電位

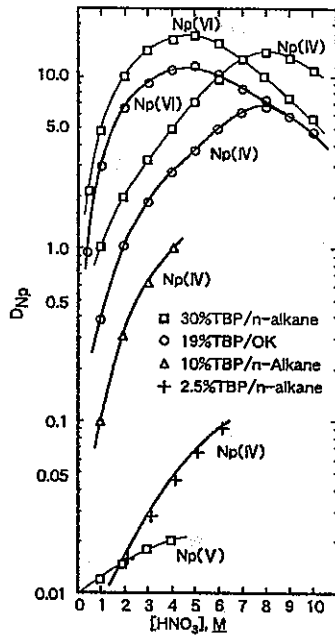


FIGURE 1. Distribution of Np(IV),(V), and (VI) between nitric acid and TBP/n-alkane solutions of varying composition ($T=20$ to 30°C)

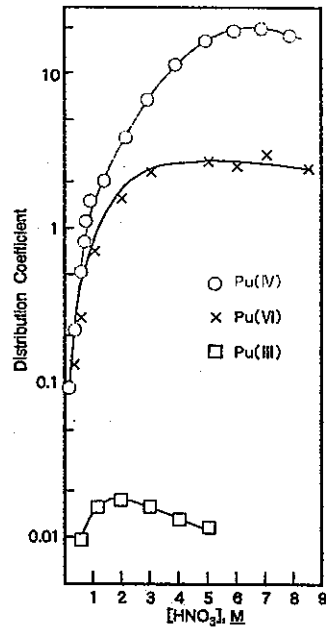


FIGURE 2. Extraction of plutonium in the III, IV and VI valency states by 20% tributyl phosphate. (From McKay, H. A. C., and Woodgate, P. R., The extraction of plutonium by tributyl phosphate. I. U. K. At. Energy Res. Establishment Rep. AERE-C/R 994, Her Majesty's Stationery Office, London, England, 1952, With permission.

図8 PuとNpの分配係数

分離 \longrightarrow Pu(IV),(VI)とNp(V)に光原子価調整
 共抽出 \longrightarrow Pu(IV),(VI)とNp(VI)に光原子価調整

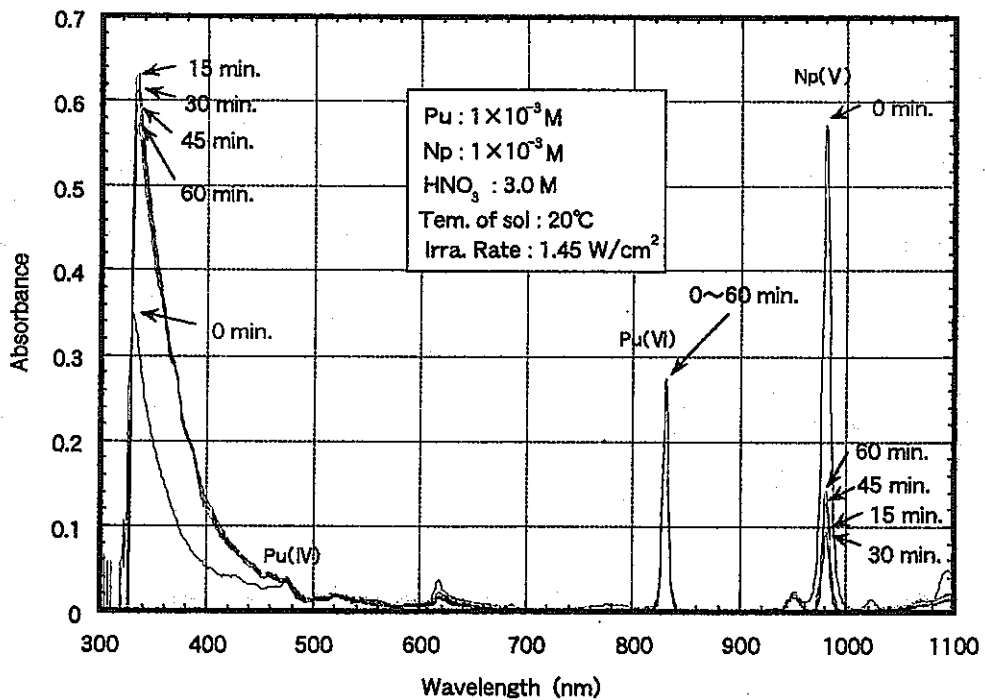


図9 添加剤を含まないPu,Np混合3M HNO₃溶液の光酸化還元反応

I. PuとNpの分離のための光原子価調整のポイント

- ①Pu³⁺を完全にPu⁴⁺に酸化する。
- ②Np⁵⁺の光酸化を防ぐ。(Np⁵⁺に完全調整)
- ③光分解生成物の亜硝酸をなくす。



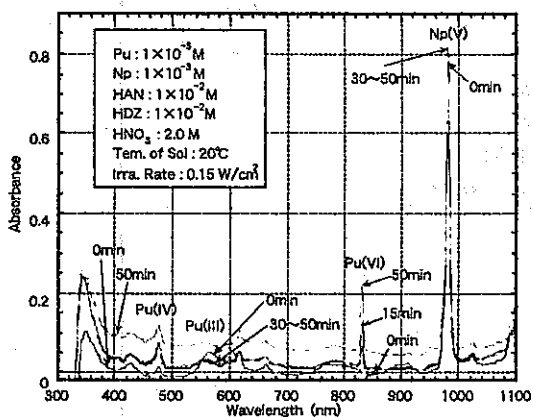
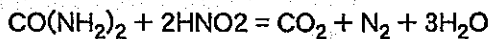
- ①ヒドラジン(HZD,亜硝酸分解剤)
 - ②ヒドロキシルアミン(HAN,還元剤)
- } の添加

II. PuとNpの共抽出のための光原子価調整のポイント

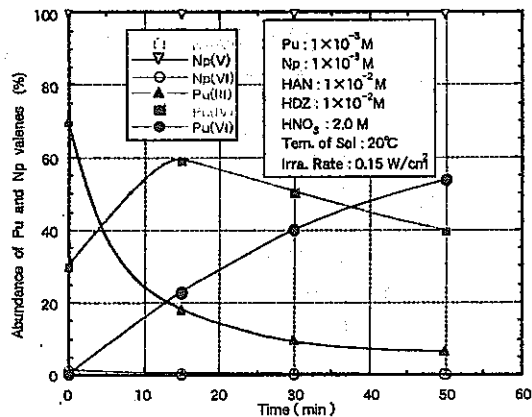
- ①Np⁵⁺を完全にNp⁶⁺に酸化する。
- ②還元性のない分解剤



尿素の添加

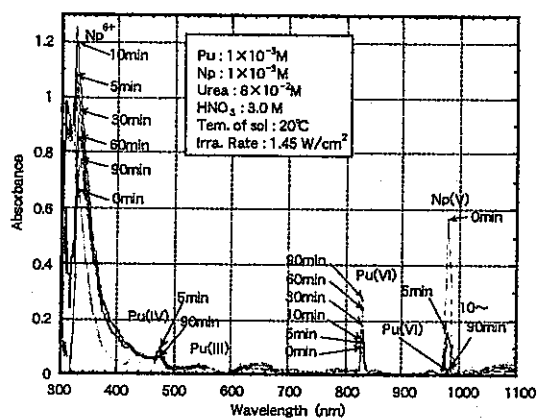


(a) Change in absorption spectra

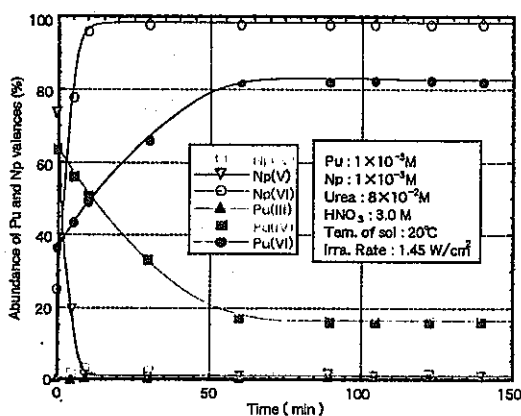


(b) Change in abundance of valences

図10 HANとHDZを含むPu,Np混合2M HNO₃溶液の光化学反応



(a) Change in absorption spectra



(b) Change in abundance of valences

図11 尿素を含むPu,Np混合3M HNO₃溶液の光化学反応

表1 光照射-溶媒抽出同時操作によるPuとNpの相互分離

(a) Abundances of Pu valences in both phases vs. operation time

Valence	Just before operation	Abundance (%)			
		Time of simultaneous ope. of irra. and ext.			
		15min	30min	50min	
Aq.	Pu(III)	70.4	3.4	1.5	0.4
	Pu(IV)	29.6	8.1	4.7	3.0
	Pu(VI)	<0.1	4.7	7.7	9.8
Org.	Pu(III)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Pu(IV)	-	71.5	45.8	26.9
	Pu(VI)	-	12.2	40.4	60.2
Gross Pu in Org.		<0.1	83.7	86.2	87.1
in Aq.		100.0	16.3	13.9	13.0
Org. / Aq.		-	5.13	6.10	6.70

(b) Abundances of Np valences in both phases vs. operation time

Valence	Just before operation	Abundance (%)			
		Time of simultaneous ope. of irra. and ext.			
		15min	30min	50min	
Aq.	Np(IV)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Np(V)	100.0	99.1	98.5	99.8
	Np(VI)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Org.	Np(IV)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Np(V)	-	0.9	1.52	0.2
	Np(VI)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Gross Pu in Org.		<0.1	0.9	1.52	0.2
in Aq.		100.0	99.1	98.5	99.8
Org. / Aq.		-	0.009	0.015	0.002

Pu : 1.0×10^{-3} M
 Np : 1.0×10^{-3} M
 HAN : 1.0×10^{-2} M
 HDZ : 1.0×10^{-2} M
 HNO₃ : 2.0M
 Temp. : 20°C
 Irra. rate : 0.15 W/cm²

表2 光原子価調整後の溶媒抽出操作によるPuとNpの共抽出

(a) Abundances of Pu valences in both phases vs. operation time

Valence	Abundance(%)					
	Photochemical val. adj. time				Solv. ext. time	
	0 min	10 min	15 min	20 min	10 min	20 min
Aq. Pu(III)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Aq. Pu(IV)	82.3	65.3	58.9	53.2	3.5	3.6
Aq. Pu(VI)	17.7	34.7	41.1	46.8	7.9	8.1
Org. Pu(III)					<0.1	<0.1
Org. Pu(IV)					36.1	36.8
Org. Pu(VI)					52.5	51.5
Gross Pu in Org.					88.6	88.3
in Aq.					11.4	11.7
Org. / Aq.					7.77	7.55

(b) Abundances of Np valences in both phases vs. operation time

Valence	Abundance(%)					
	Photochemical val. adj. time				Solv. ext. time	
	0 min	10 min	15 min	20 min	10 min	20 min
Aq. Np(IV)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Aq. Np(V)	100.0	7.0	0.3	<0.1	7.7	7.7
Aq. Np(VI)	<0.1	93.0	99.7	100.0	<0.1	<0.1
Org. Np(IV)					<0.1	<0.1
Org. Np(V)					<0.1	<0.1
Org. Np(VI)					92.3	92.3
Gross Pu in Org.					92.3	92.3
in Aq.					7.7	7.7
Org. / Aq.					12.0	12.0

Pu : 1.0×10^{-3} M HNO₃ : 3.0M
 Np : 1.0×10^{-3} M Temp. of sol. : 20°C
 Urea : 8.0×10^{-2} M Irra. rate : 1.45 W/cm²

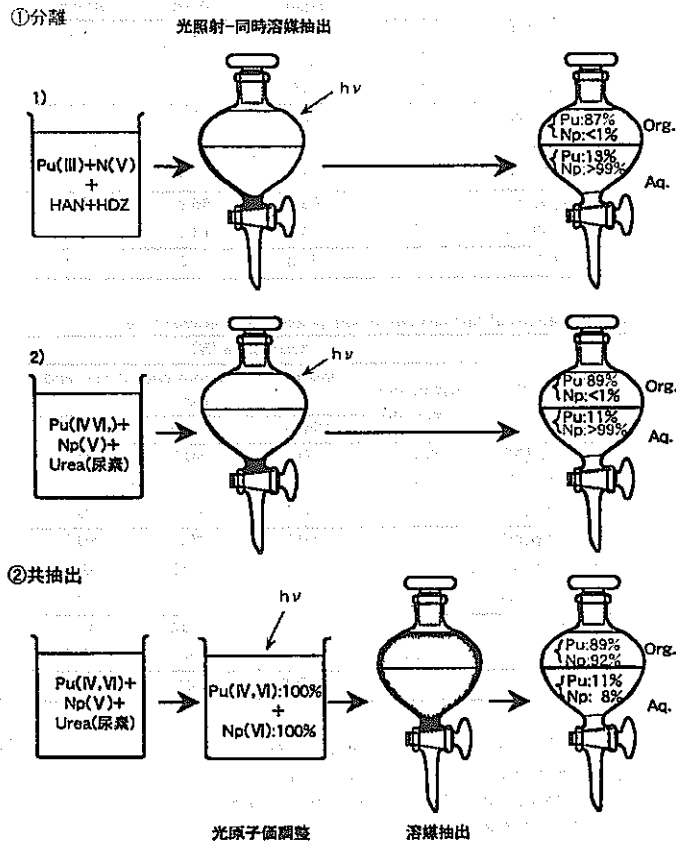


図12 光化学的Pu,Npの分離、共抽出結果

UO₂溶解メカニズムの研究

① ¹⁷O-enriched UO₂, NMRを用いた溶解メカニズム研究

By Y. Ikeda and H. Tomiyasu

② ¹⁸O-enriched water, NMRを用いたPuO₂溶解メカニズム研究

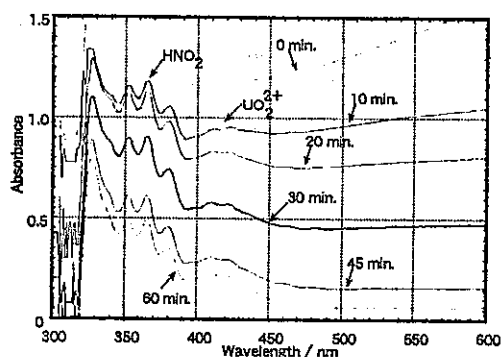
By X. Machuron-Mandard and C. Madic

1 or 2電子移動の酸化還元反応

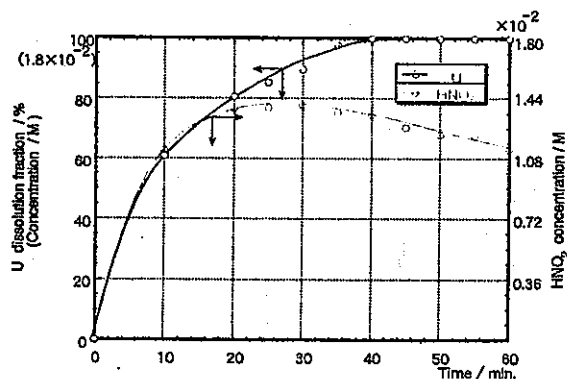
による溶解機構と結論

より高い酸化還元電位を持った光励起分子種
またはイオンによる効率的な溶解反応

光励起硝酸, *NO₃⁻による溶解

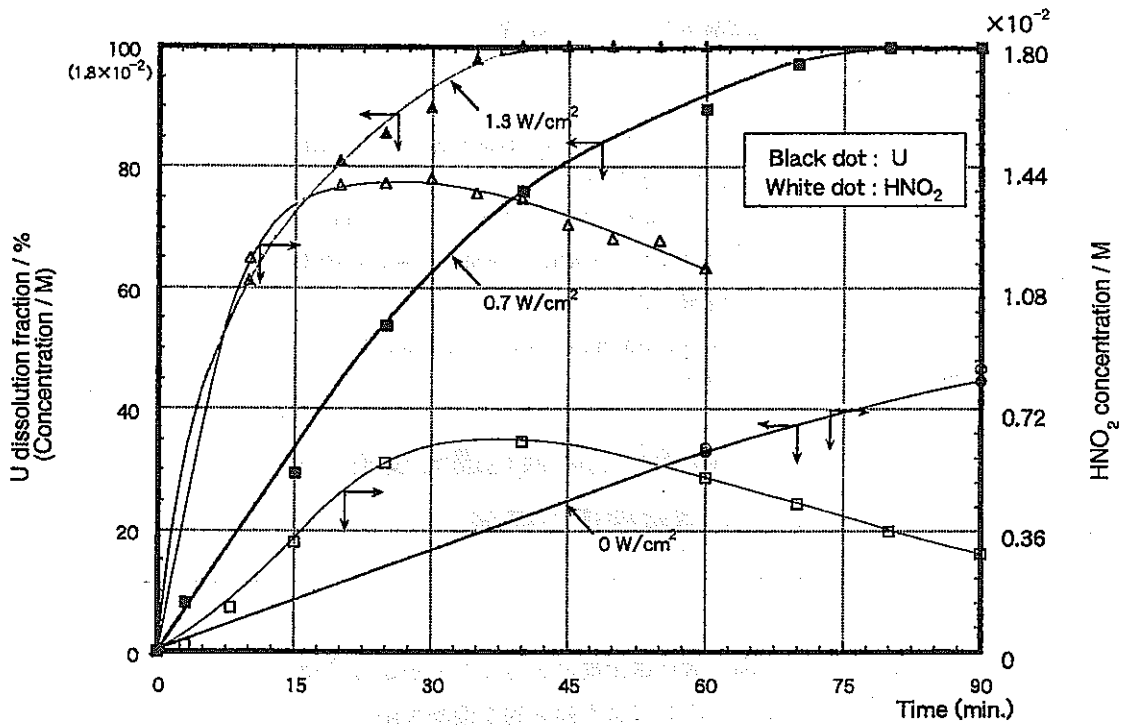


Vol. : 2ml, UO₂ powder : 10mg, Irra. rate (Hg lamp) : 1.3W/cm²
(a) Absorption spectrum



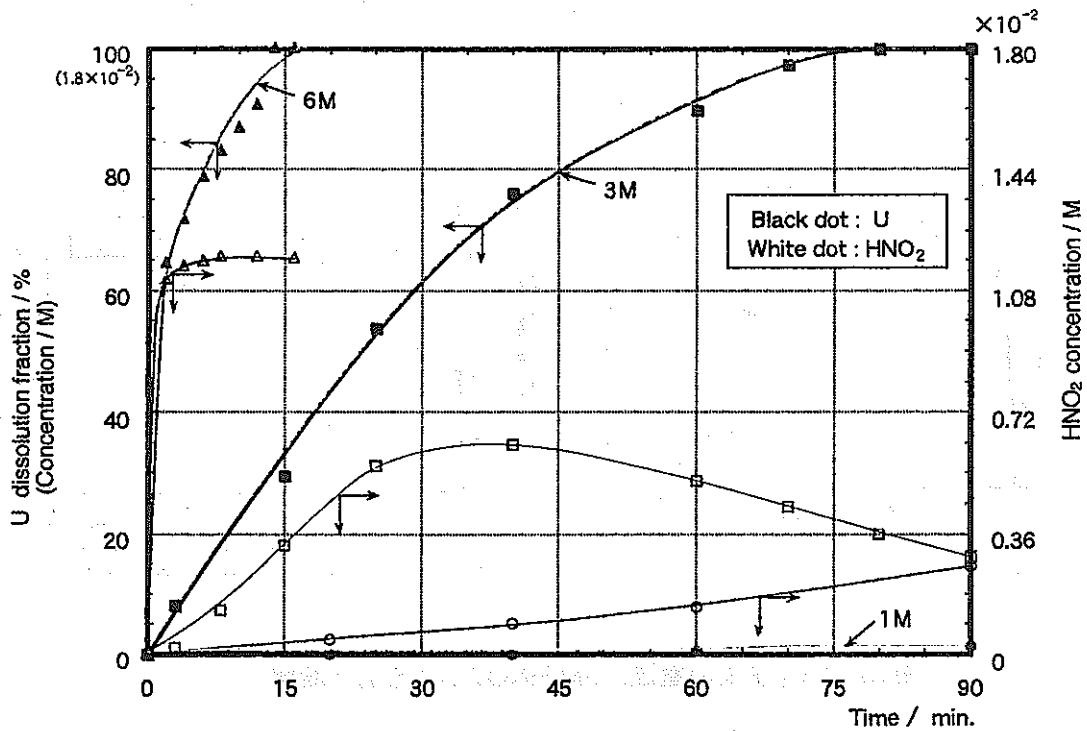
Vol. : 2ml, UO₂ powder : 10mg, Irra. rate (Hg lamp) : 1.3W/cm²
(b) Plots of dissolution fractions and HNO₂ concentration vs. time

図13 UO₂粉末の室温、3M HNO₃での光化学溶解



Irra.rate(Hg lamp): 0 W/cm^2 ; ● and ○, 0.7 W/cm^2 ; ■ and □, 1.3 W/cm^2 ; ▲ and △,
 Weight of UO_2 : 10mg, Vol. of sol. : 2ml

図14 光照射率変化による UO_2 粉末の $3\text{ M HNO}_3, 20^\circ\text{C}$ における光化学溶解曲線の比較



Conc. of HNO_2 : ▲ and △ ; 6M, ■ and □ ; 3M, ● and ○ ; 1M, Vol. of sol. : 2ml
 Irra. rate (Hg lamp) : 0.7 W/cm^2 , Weight of UO : 10mg

図15 硝酸濃度変化による UO_2 粉末の 20°C における光溶解曲線の比較

表4 光照射率による光化学溶解速度の変化

(a) UO_2 : 10mg

Irra. rate (W/cm^2)	Disso. rate coef. ($mol \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$)	Ratio to dark. rate coef.	Time for complete disso. (min.)
1.3	3.50×10^{-6}	14.4	40
0.7	1.05×10^{-6}	4.3	78
0.0	2.43×10^{-7}	-	350

Acidity : 3M HNO_3 , Temp. of sol. : 20°C

(a) UO_2 : 100mg $50g/l$

Irra. rate (W/cm^2)	Disso. rate coef. ($mol \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$)	Ratio to dark. rate coef.	Time for complete disso. (min.)
1.3	9.35×10^{-6}	8.9	14
0.5	3.00×10^{-6}	2.9	40
0.0	1.05×10^{-6}	-	60

Acidity : 3M HNO_3 , Temp. of sol. : 20°C

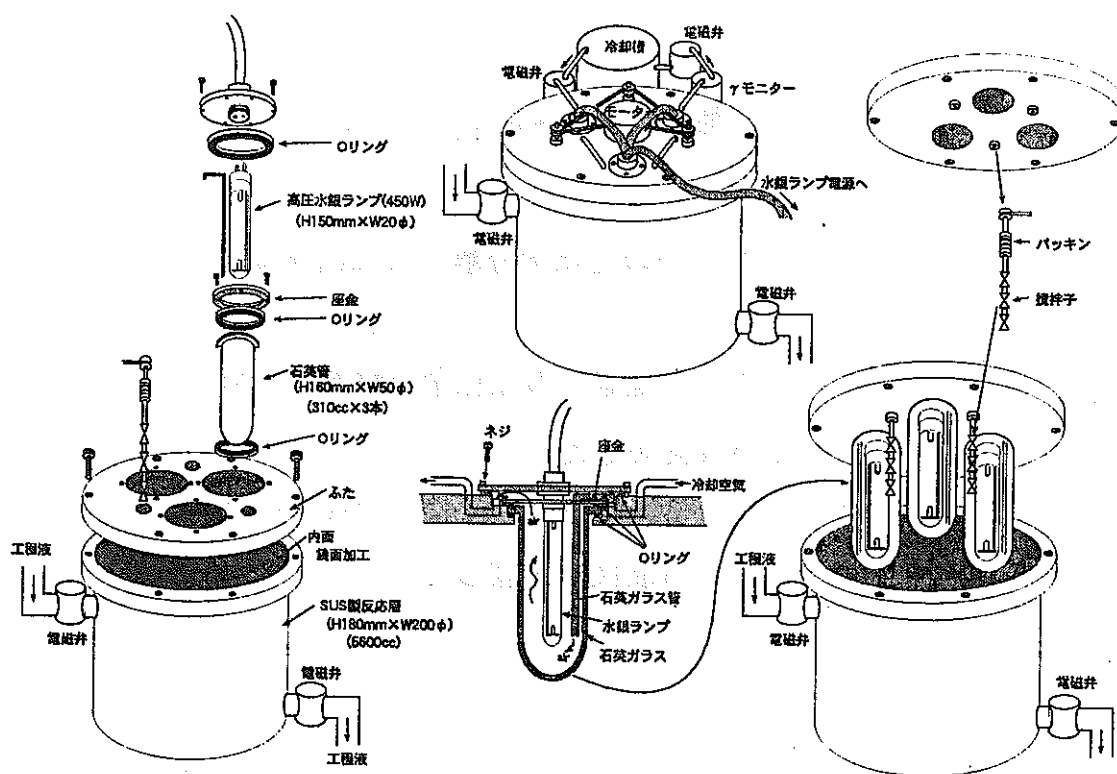


図17 光化学反応装置概念

(Dissolution process) (Coextraction process) (Partition process)

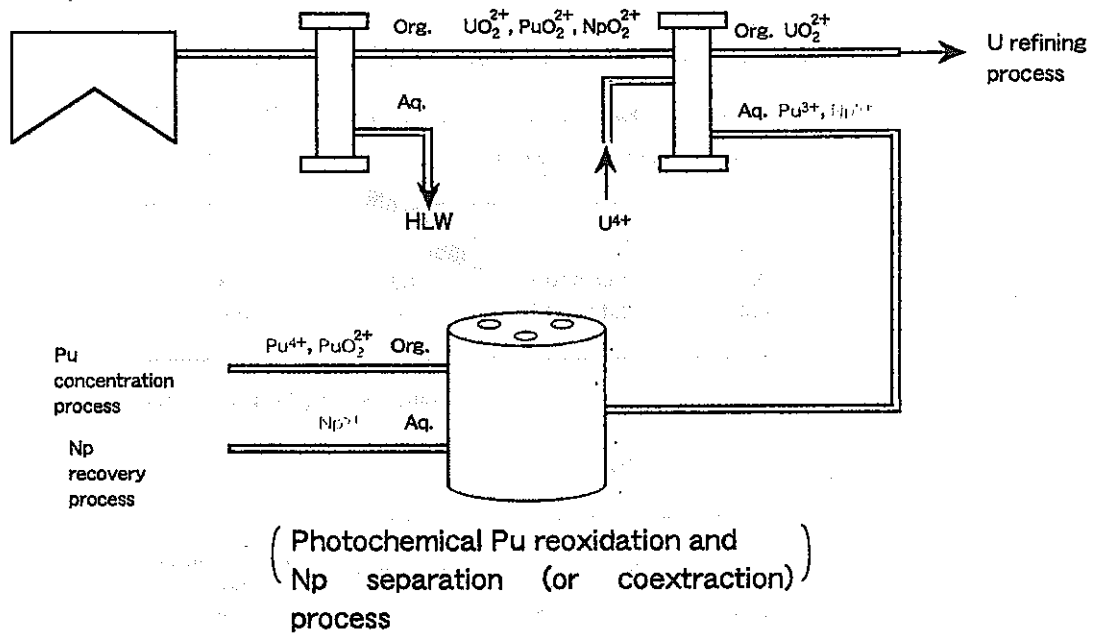


図18 再処理工程への光化学技術の適用概念

結論

- (1) 光励起硝酸、*NO₃⁻、の光化学効果を
確認した。
- (2) Pu, Npの光化学分離、共抽出を実証
した。
- (3) UO₂の室温での光化学溶解をはじめて
原理実証した。
- (4) 光化学の核燃料サイクル技術への応
用性の可能性を確認した。

(3) 自律型運転制御システムの開発

自律型運転制御システムの開発

— 運転員の代替を目指して —

大洗工学センター 基盤技術開発部
先進技術開発室

小澤 健二

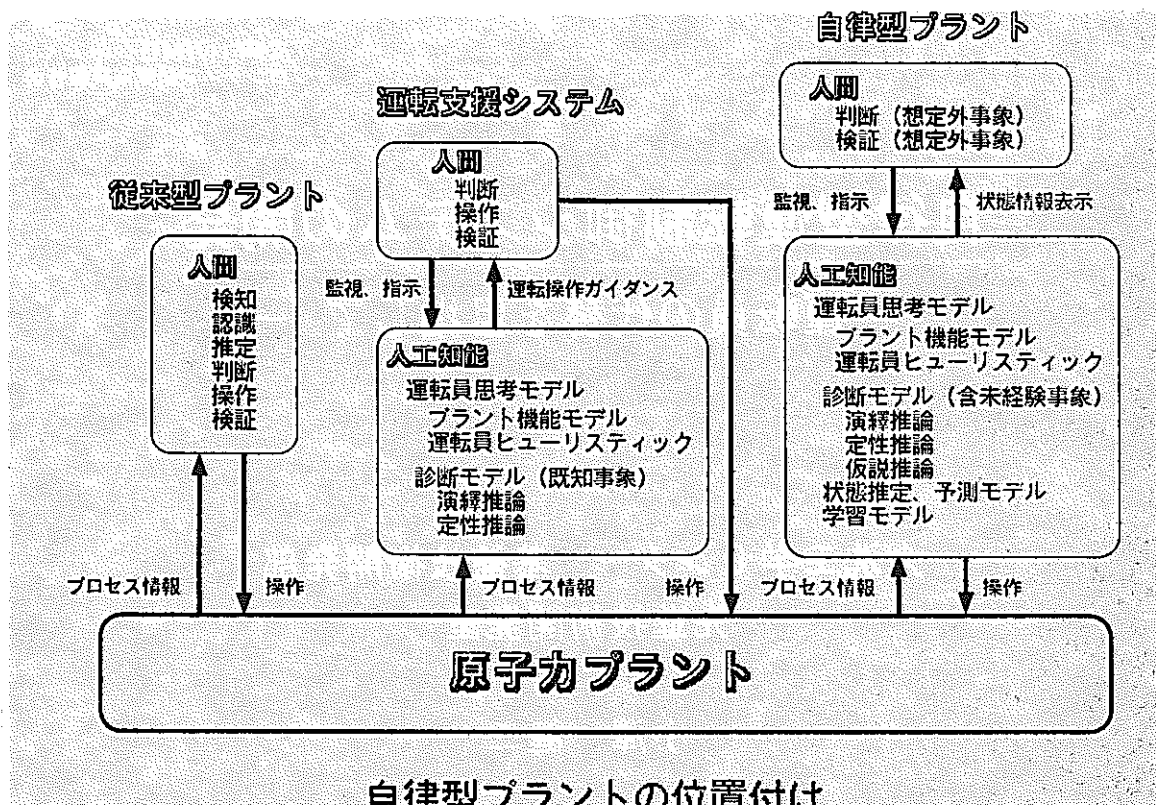
自律型運転制御システムの開発

目的

- ・原子カプラントの運転・制御における
人的因子の排除による信頼性の向上
- ・制御性能の向上

第Ⅰ期の開発目標

限定した異常事象に対応できる人工知能を用いた
ループタイプFBRの主要システムを対象にしたプロ
トタイプシステムを開発し、自律型運転制御シス
テムの現実性に対する見通しを得る



自律型プラントの位置付け

自律の定義：「人間によって与えられた規範に従って、自分自身で行動すること」

自律の規範

	N P S に必要な機能	自律の規範	達成度
1	電力供給の維持	基本機能維持	半ば達成
2	異常時のプラント運用	自己組織化	未達成
3	運転経験の蓄積と反映	自己改良	未達成
4	事故時のプラント保護	自己防護	ほぼ達成
5	公衆災害の防止	外界との調和	ほぼ達成

自律型運転制御システムの開発基本方針

(1) 基本機能維持

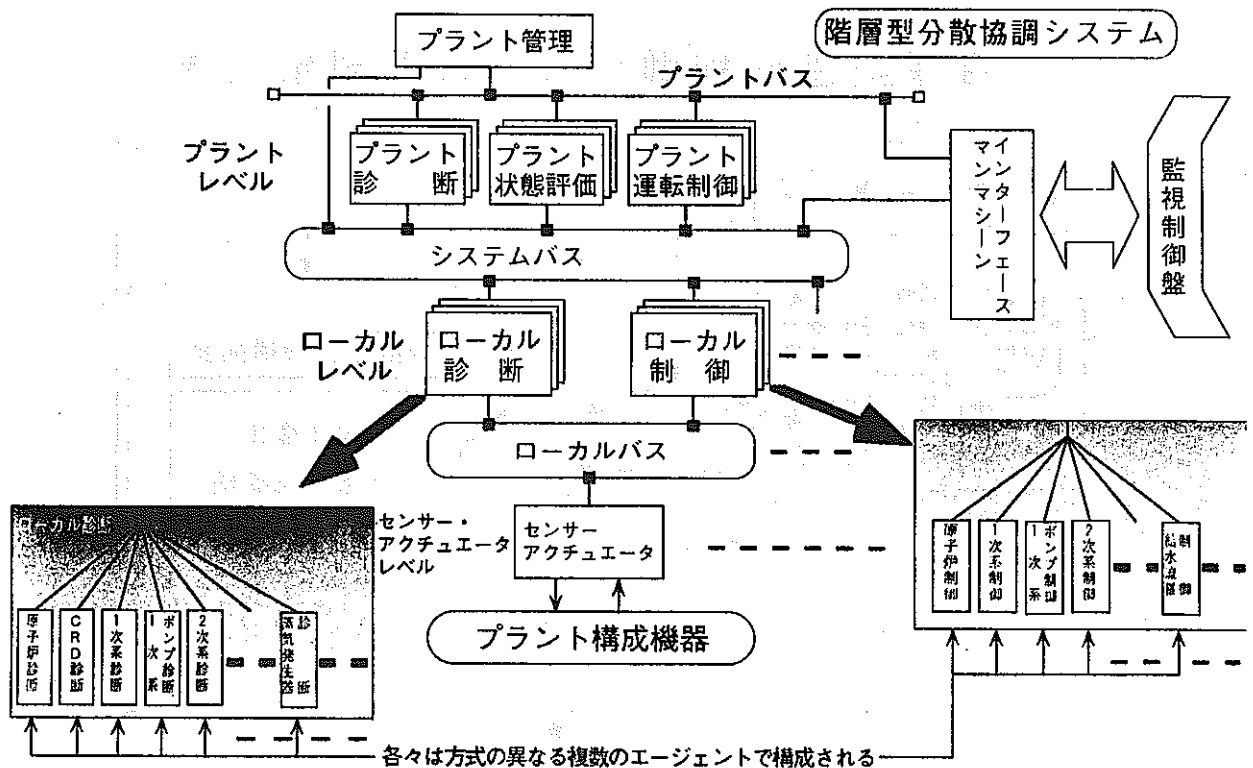
運転員の知識に基づく判断をAIにより実現

- ・モデルベーストアプローチ 他

(2) 自己組織化

システム機能の動的な再組織化を実現

- ・階層型分散マルチエージェント
- ・方式の多様化 他



自律型運転制御システムの機能構成

階層型分散協調システムの特徴

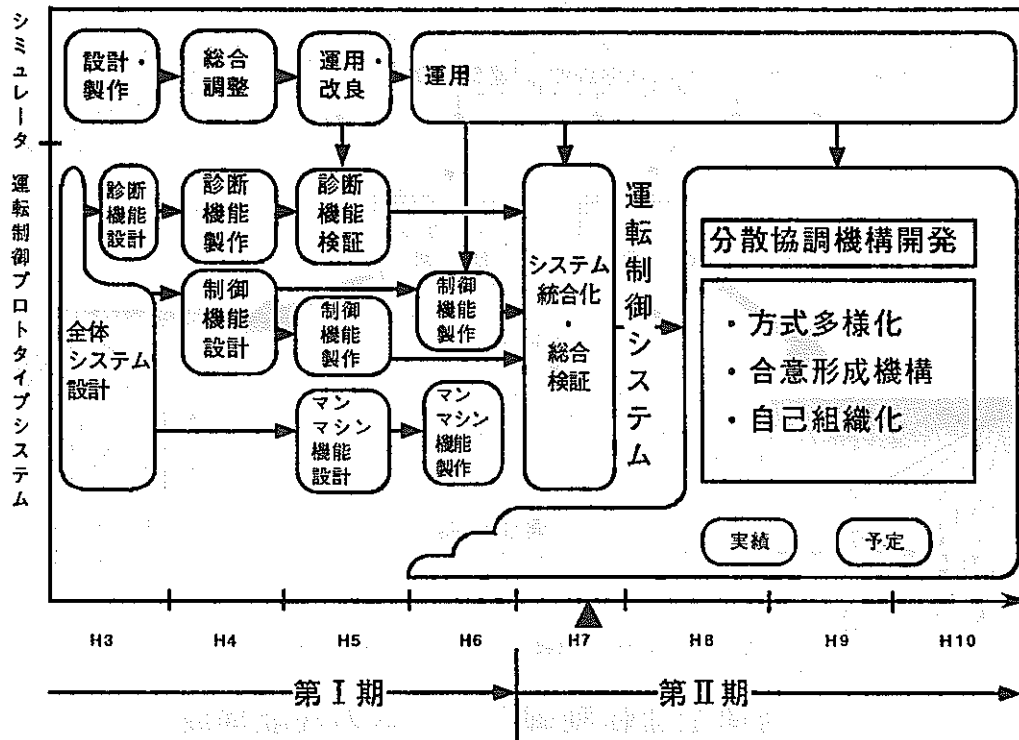
1. 階層型

- ・レベルに応じた役割
- ・上位下達
- ・全体の理解が容易

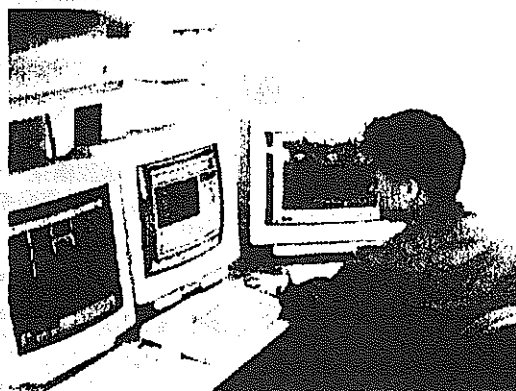
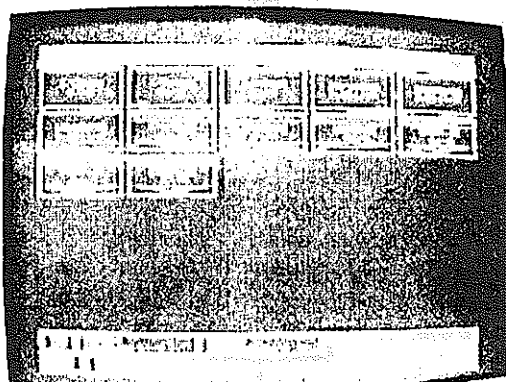
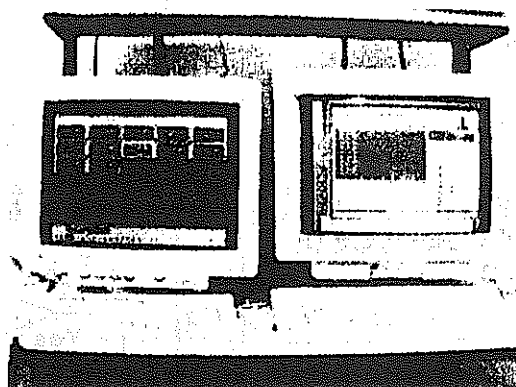
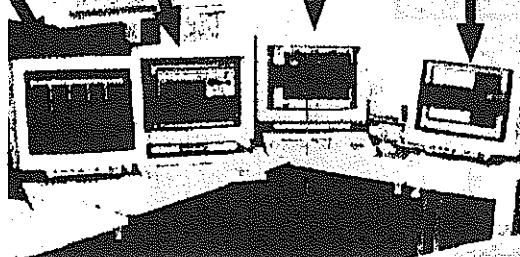
2. 分散協調系

- ・システム構造の単純化
- ・危険分散
- ・自己組織化（動的再配列）
- ・診断、保守の局所化
- ・相互バックアップ

自律型運転制御システムの開発工程

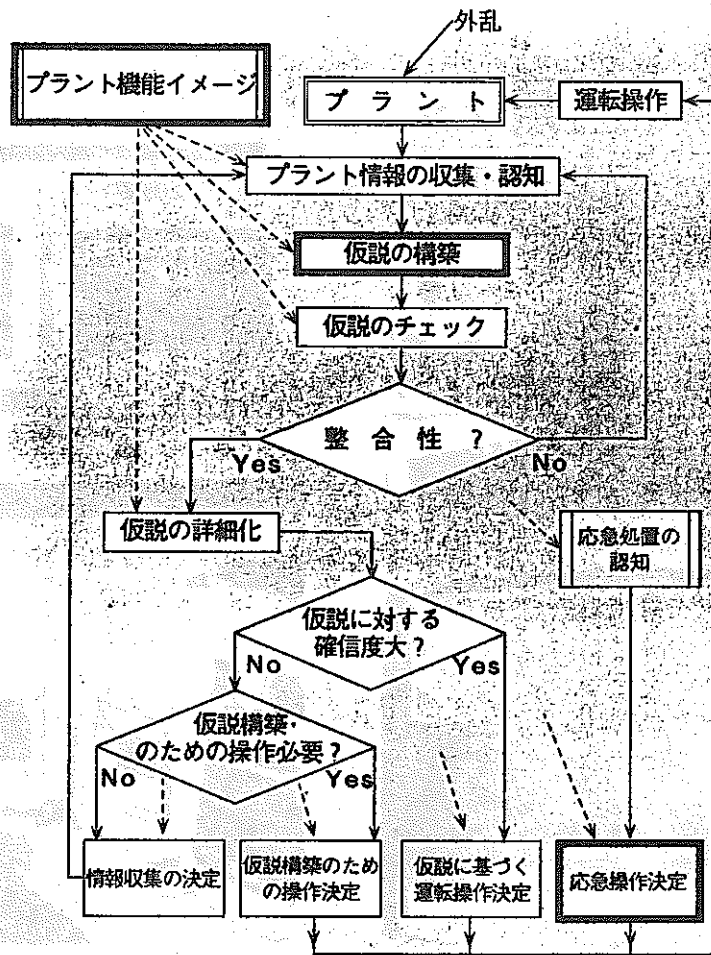


診断用WS MMI用WS
シミュレータ 制御用WS



運転員思考モデルの開発

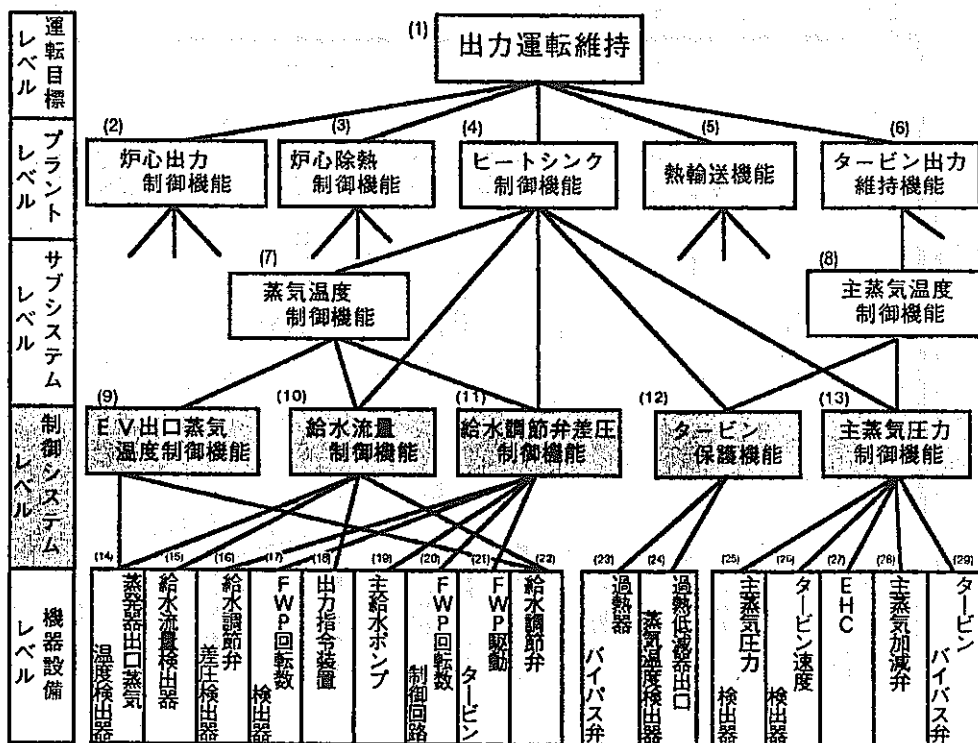
- ・ 仮説構築モデル
- ・ 応急操作決定モデル
- ・ 機能階層化モデル



開発した運転員思考モデルの概要

診断サブシステムの開発

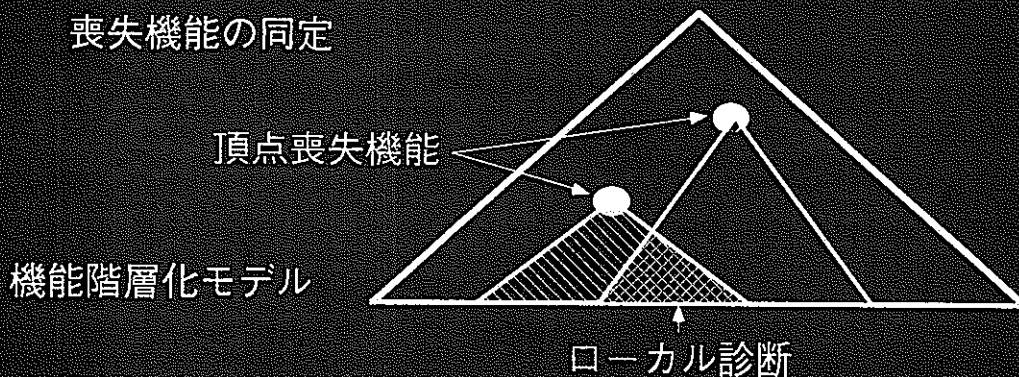
1. プラントレベル診断システム
 - ・ 安全性の確保, 運転継続性の観点からのプラント状態の評価と診断
 - ・ 運転員思考モデルに基づく診断
2. ローカルレベル診断システム
 - ・ 構成機器の診断, 原因同定, 影響範囲推定
 - ・ 物理因果モデルに基づく診断

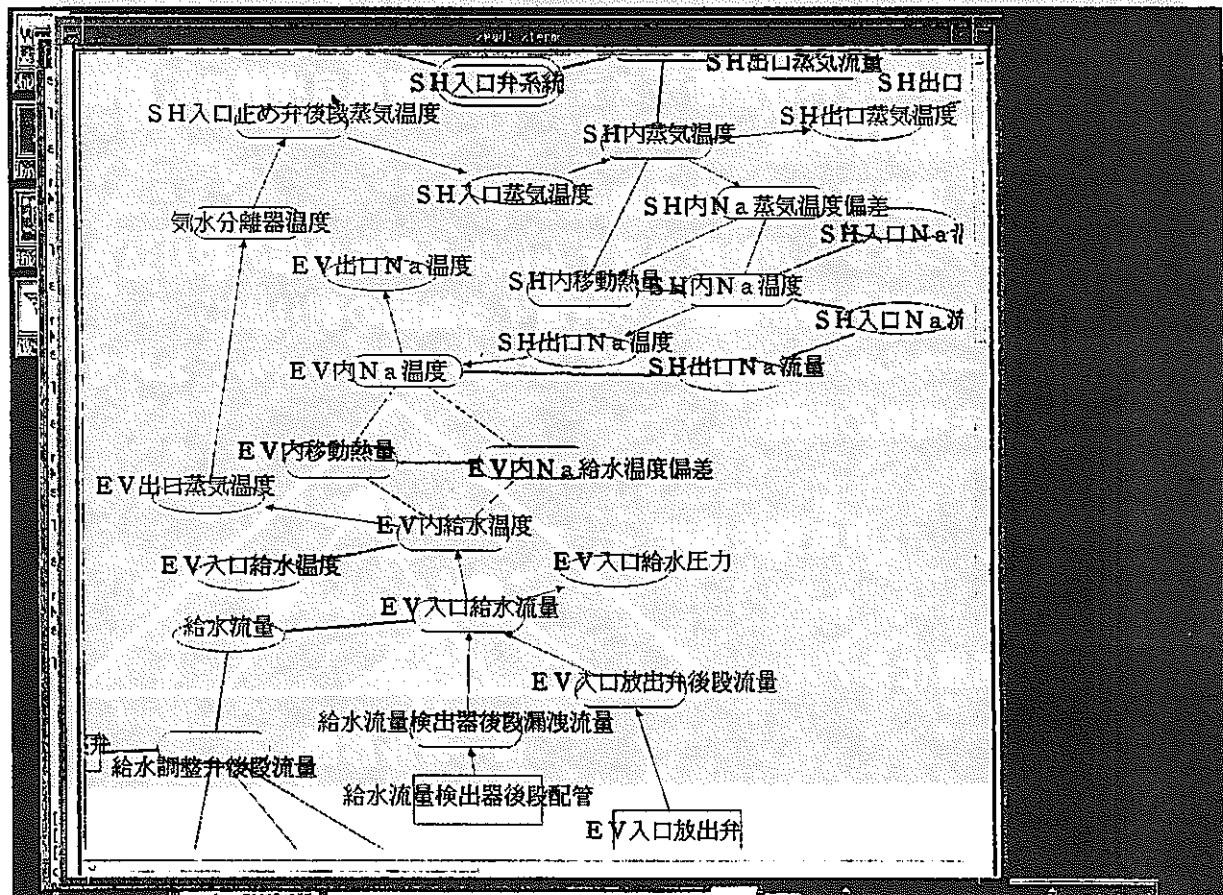
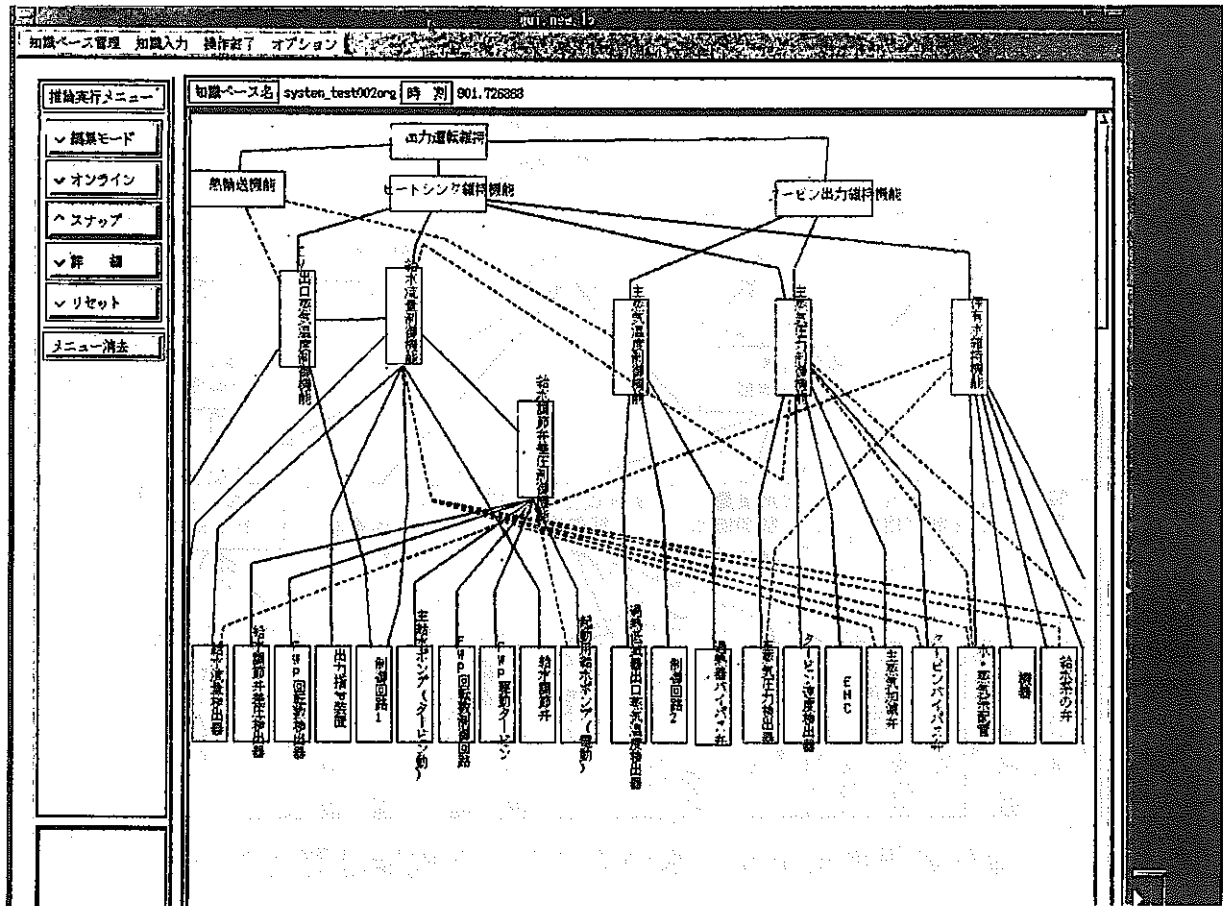


運転員思考モデルに基づくプラント機能階層化モデル

プラント診断法

1. プラントレベル診断システムによる運転目標維持、制御目標維持の判定
 - ・ 頂点喪失機能の探索
2. プラントレベル診断システムによる喪失機能の絞り込み
 - ・ 複数の頂点機能から共通する範囲の割り出し
3. ローカルレベル診断システムによる機器レベルにおける喪失機能の同定





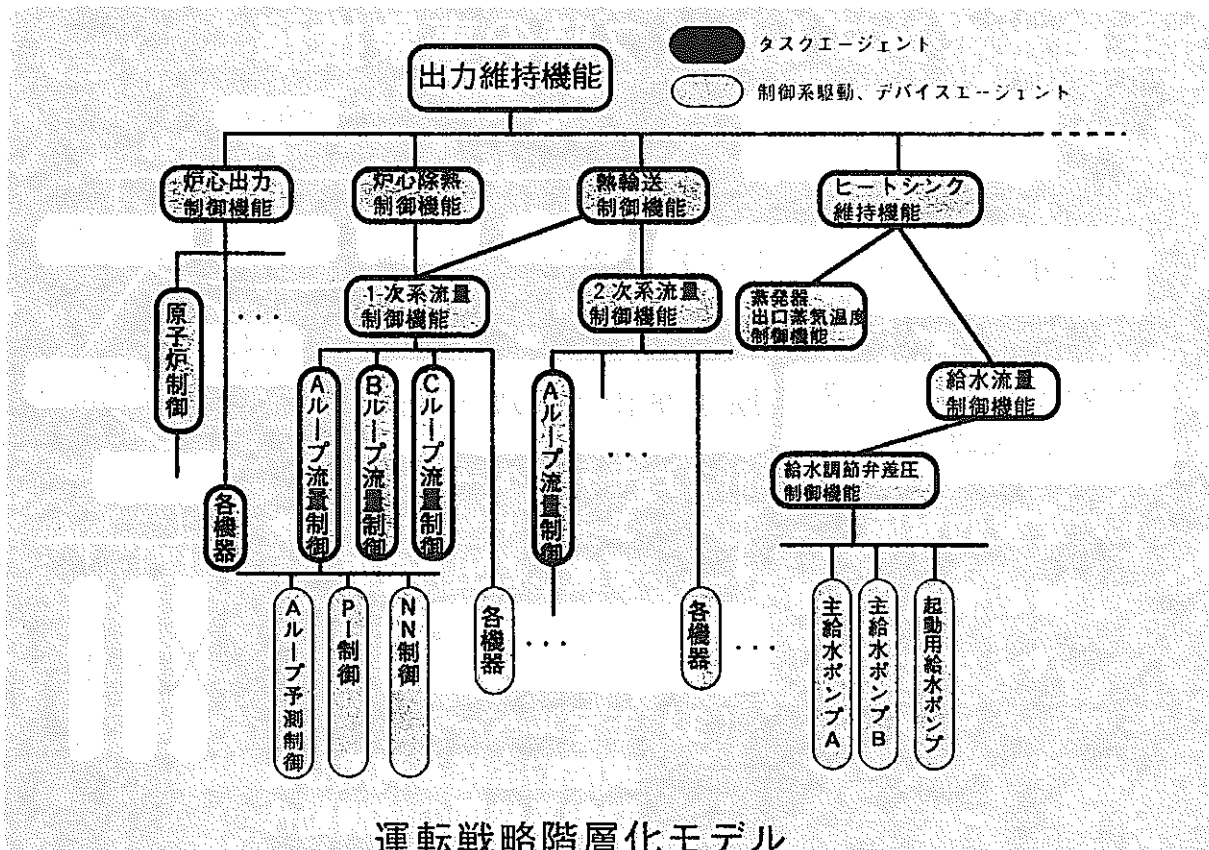
制御サブシステムの開発

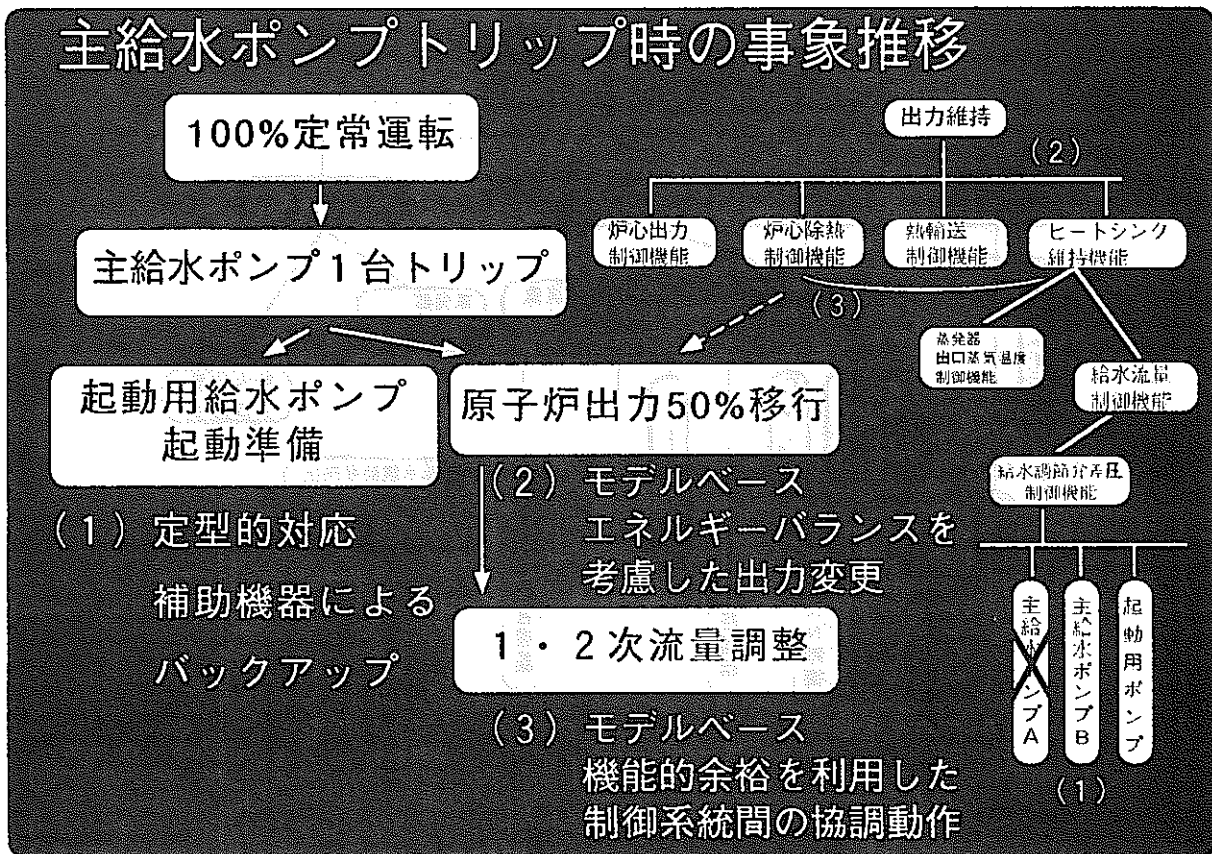
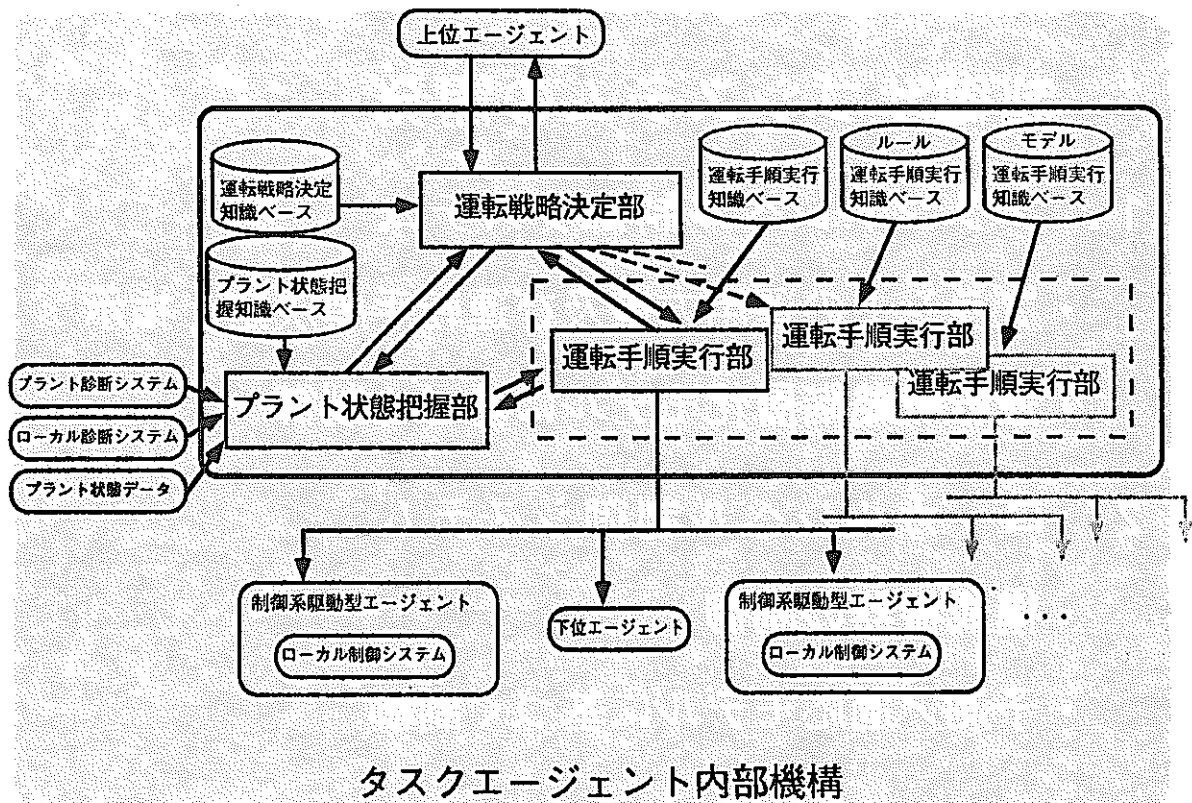
1. プラントレベル制御システム

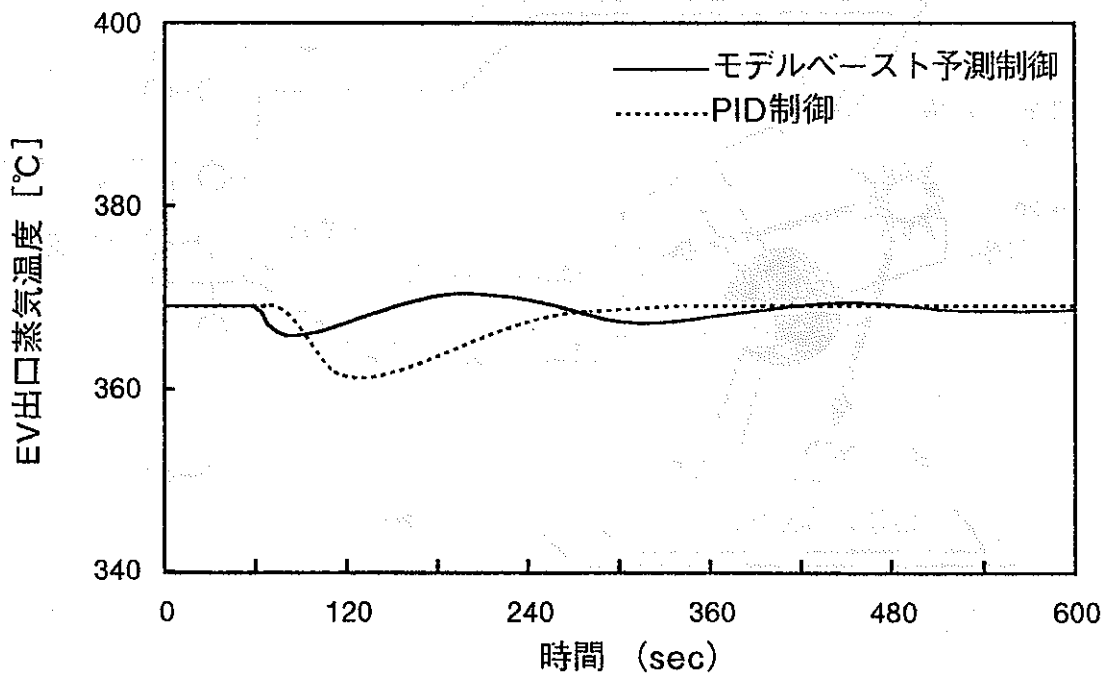
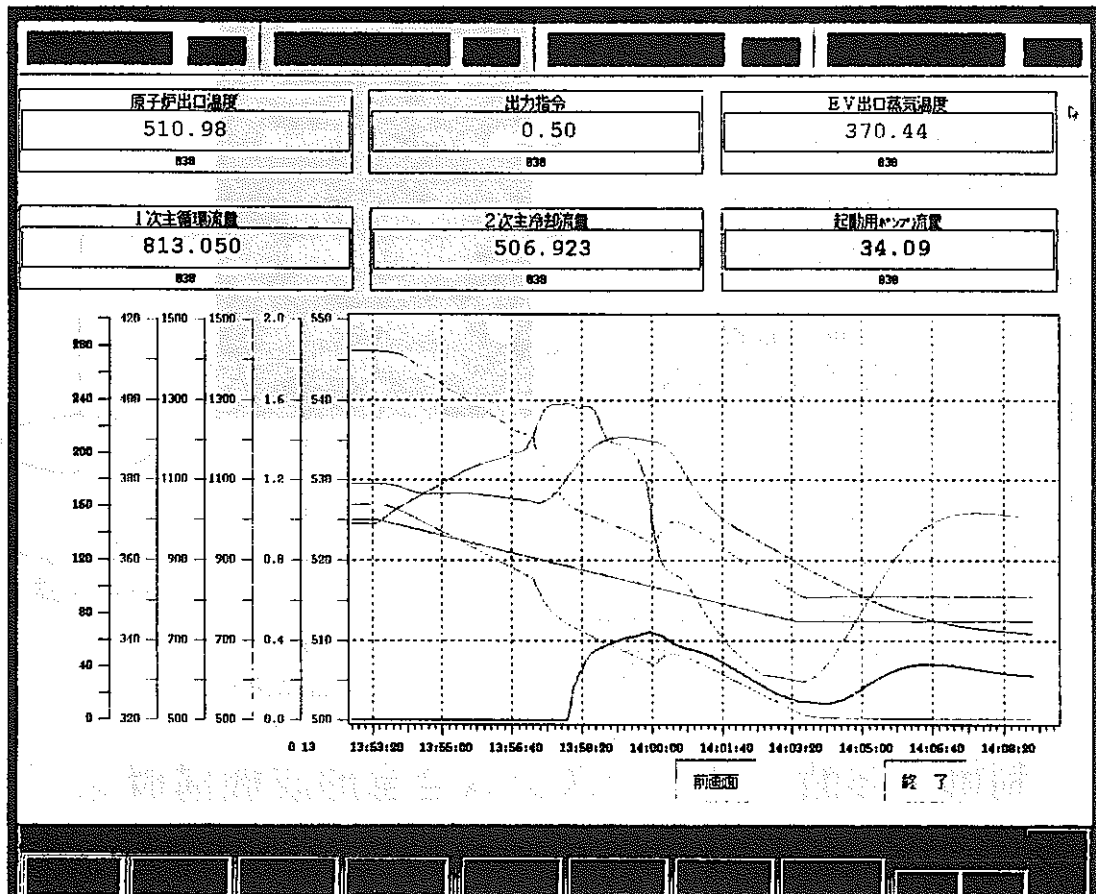
- ・プラントの運用方策及び運転手順決定, 指示
- ・運転戦略階層化モデルに基づく制御

2. ローカルレベル制御システム

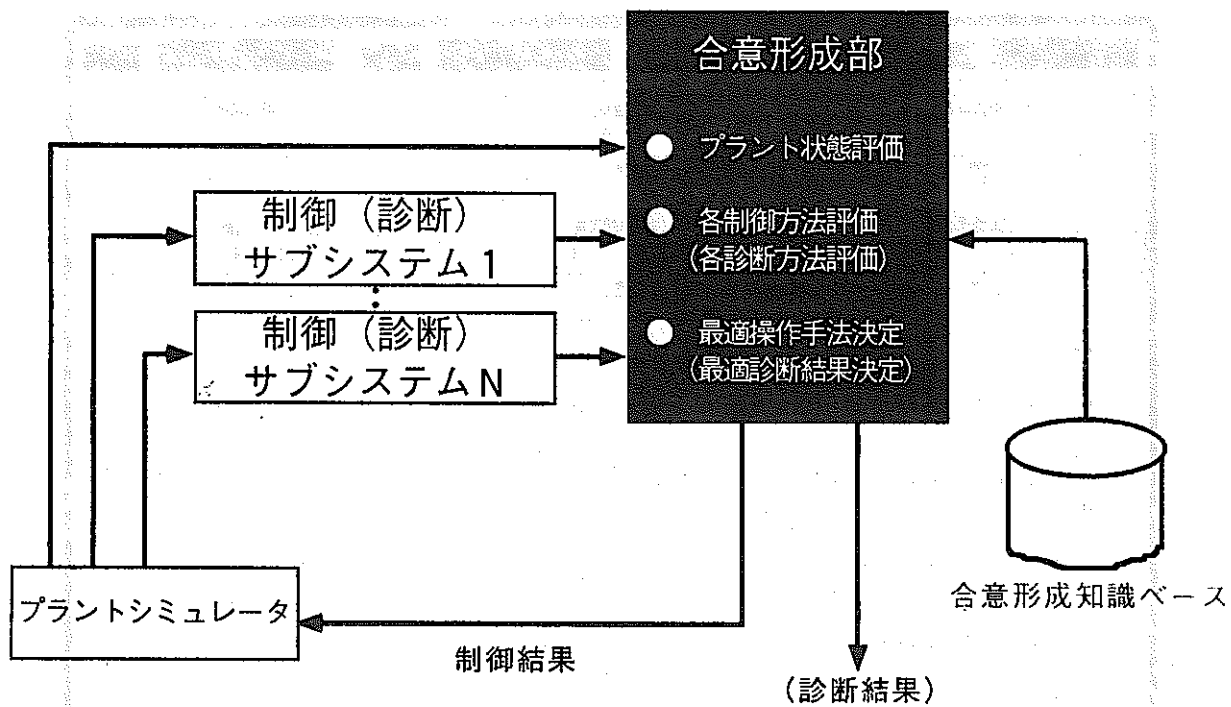
- ・構成機器の制御
- ・予測/適応モデルに基づく制御



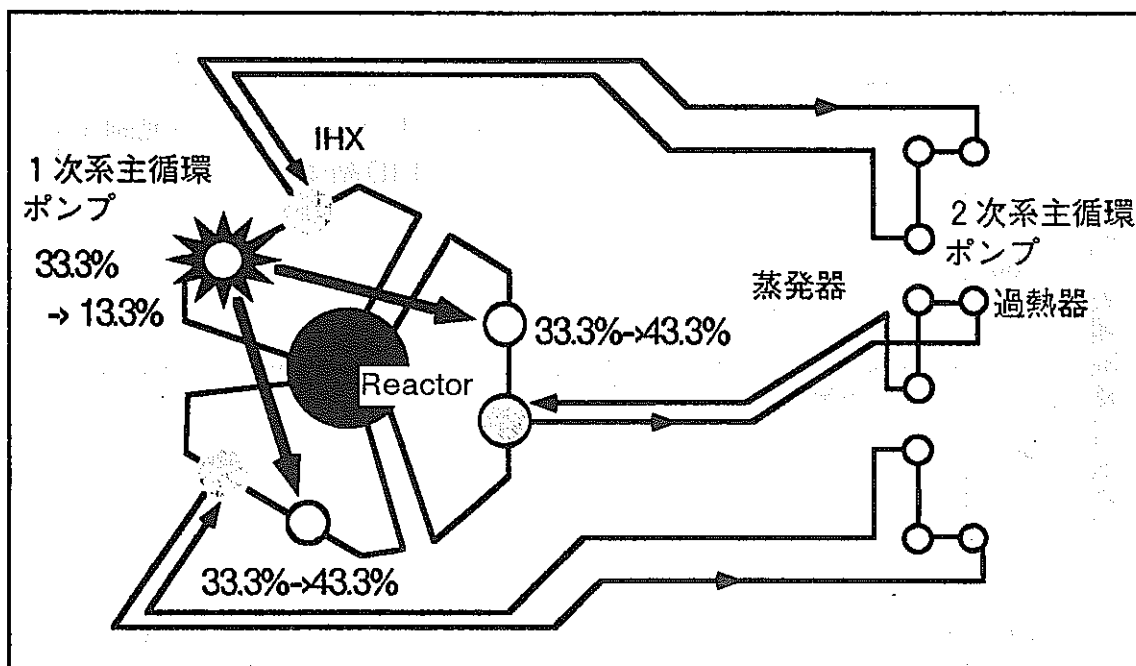




モデルベースト予測制御による蒸発器出口蒸気温度制御



制御 (診断) サブシステム合意形成機構概念



プラントにおける自己組織化例

成果のまとめ

1. 階層型分散協調方式に基づくシステム構築
2. 運転員思考モデルに基づくプラント診断・制御手法の確立
3. 物理因果モデルに基づく診断方式の開発
4. 予測／適応モデルに基づく制御方式の開発

今後の展開

1. プロトタイプシステムの総合検証・評価
2. 方式の多様化のためのシステム開発
3. 診断・制御の合意形成機構の開発
4. 自己組織化手法の開発
5. 自己学習機能の検討

(4) 新概念高速炉の研究

新概念高速炉の研究
高速炉の多目的利用を目指して

大洗工学センター
基盤技術部
先進技術開発室

大坪 章

検討項目

1. コージェネレーション
2. 水素製造
3. 二相流自然循環型
除熱システム
4. 地下立地
5. 核融合ー核分裂ハイ
ブリッド
6. 可搬型

目的

新概念炉・可搬型炉 (深海等)

現在使用されている非
原子力電源の性能限界
を克服し、観測データ
の数及び質を、飛躍的
に向上させる。

深海炉

出力：20-40kW,
200-400kW
燃料：UN(MOX)
冷却材：NaK

温度：炉容器出口
550-600°C

構造材/被覆管：
SUS316/ハステロイN

寿命：30年 (10年 x 3)

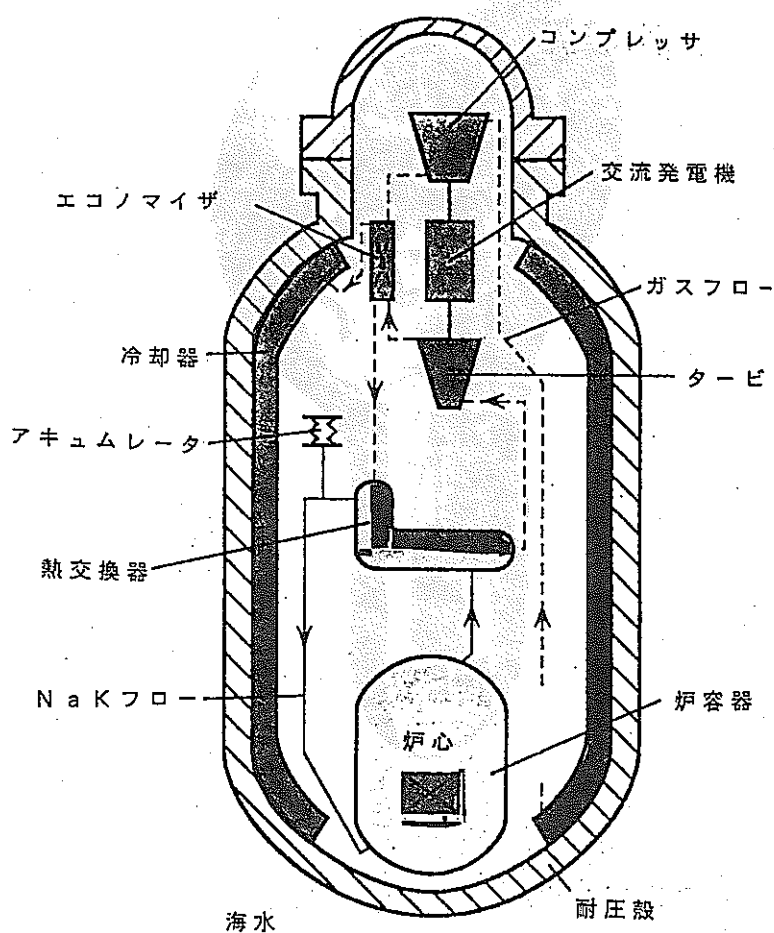
研究開発に特に課題無し

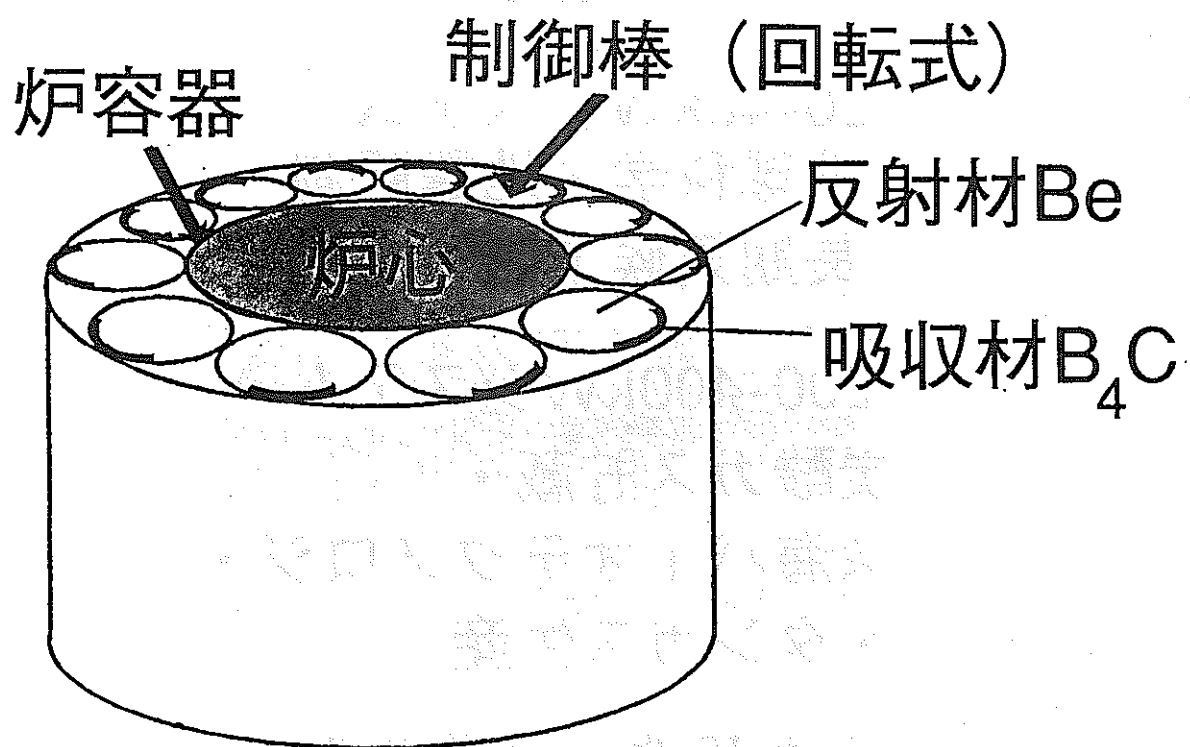
用途

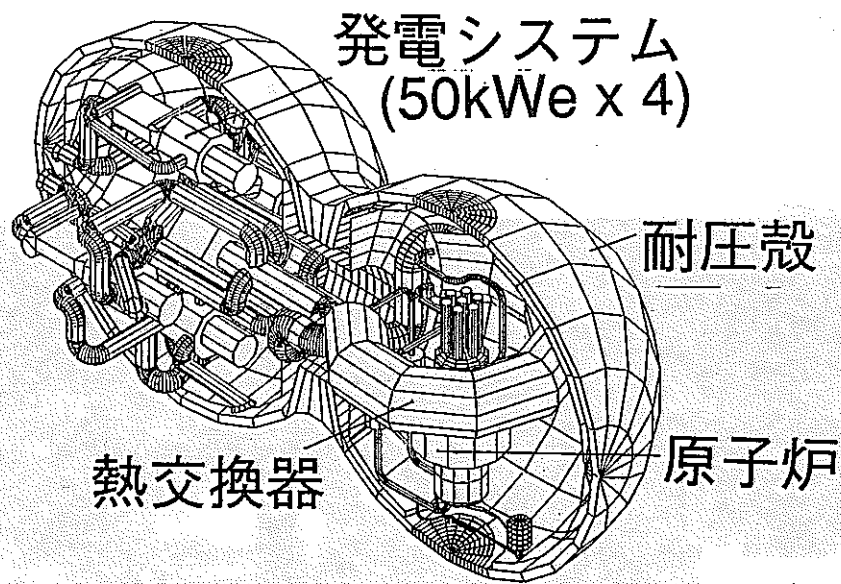
20-40kWシステム
地球科学・地震観測・
長期気候予測

200-400kWシステム
炭酸ガス貯蔵・
深海バイオテクノロジー・
メタンガス生産

海底基地は科学の新
分野を拓く (材料・AUV)







高速炉システム(200kWe)

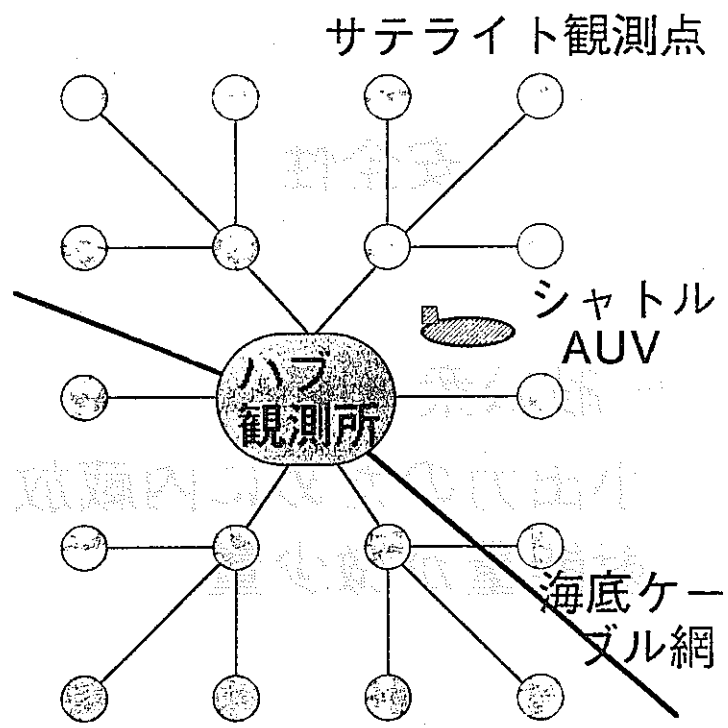
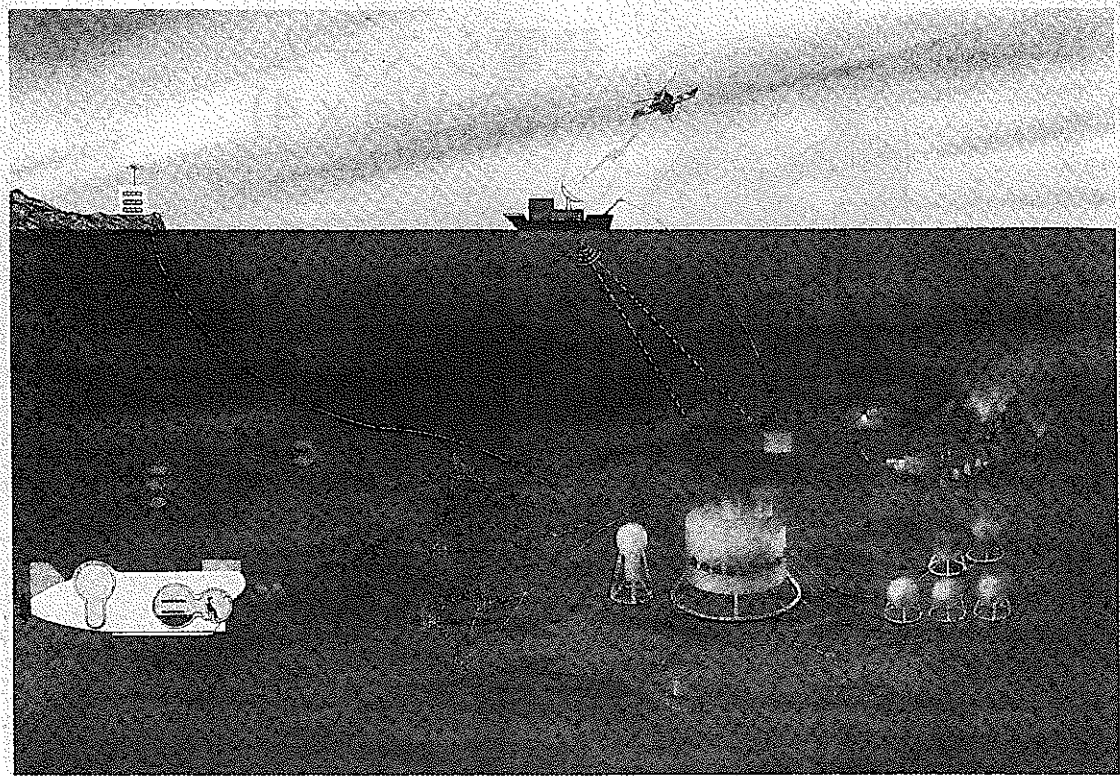
安全性

一般公衆

小出力のために内蔵放射
エネルギーが微量

職業人

NaK-水反応は実験で
安全性を確認



ハブ：1000km 四方に1カ所
 サテライト：100km 四方に1カ所

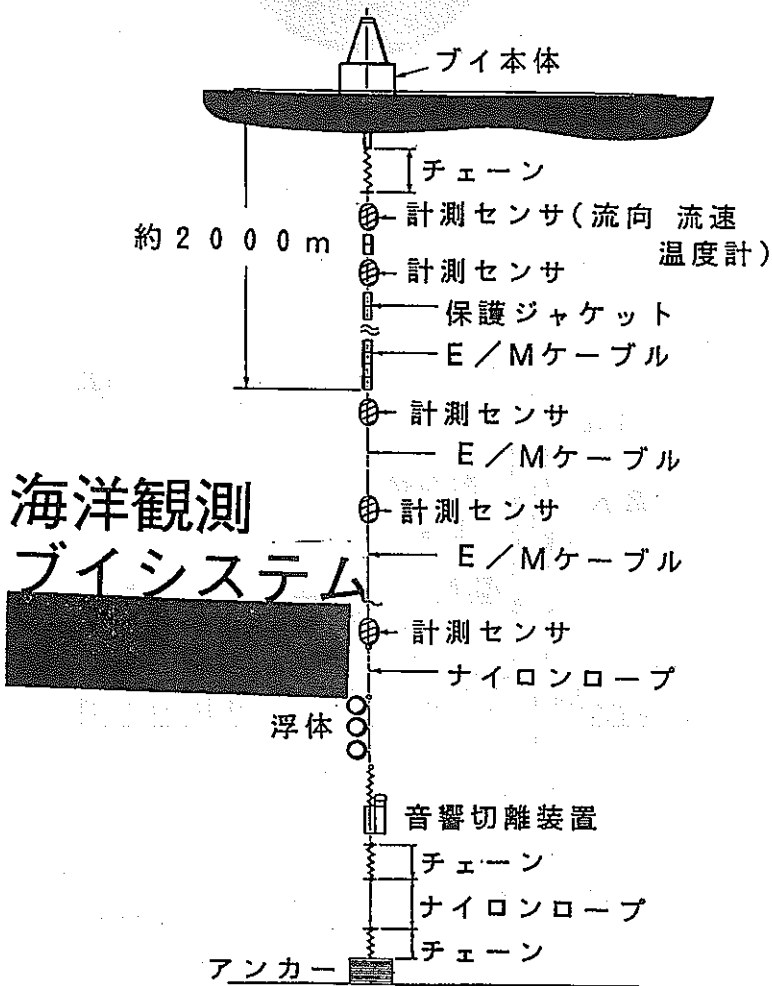
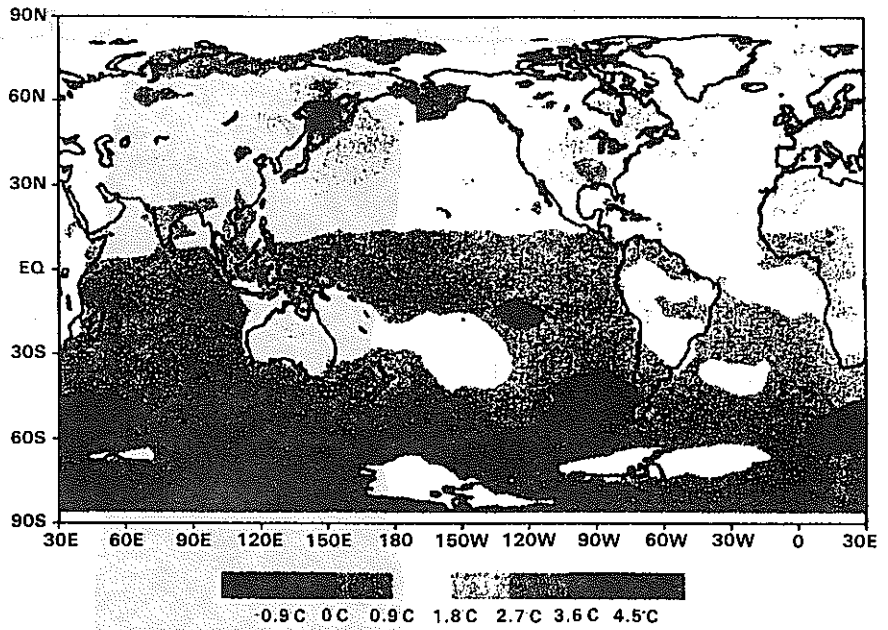
夢の海底長期観測所

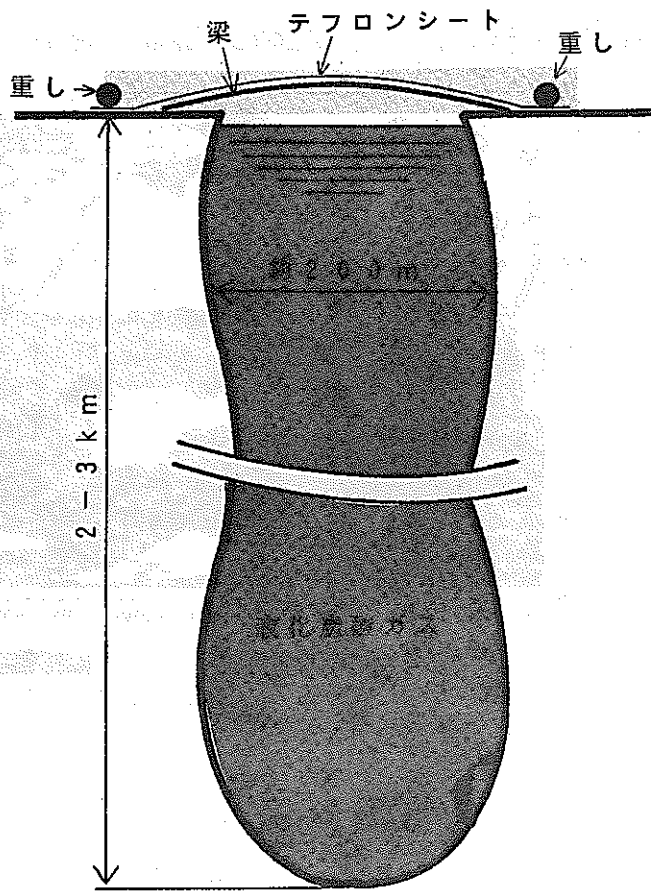
新しい気候モデルを開発し、50年後の気温上昇を予測した。

地球温暖化問題を研究している気象庁気象研究所は、新しい気候モデルを開発し、50年後の気温上昇を予測した。この予測によると、2035年には世界平均で1.2度C気温が上昇する。とくに北半球での気温上昇が大きく、オホーツク海では約4度C上昇する。

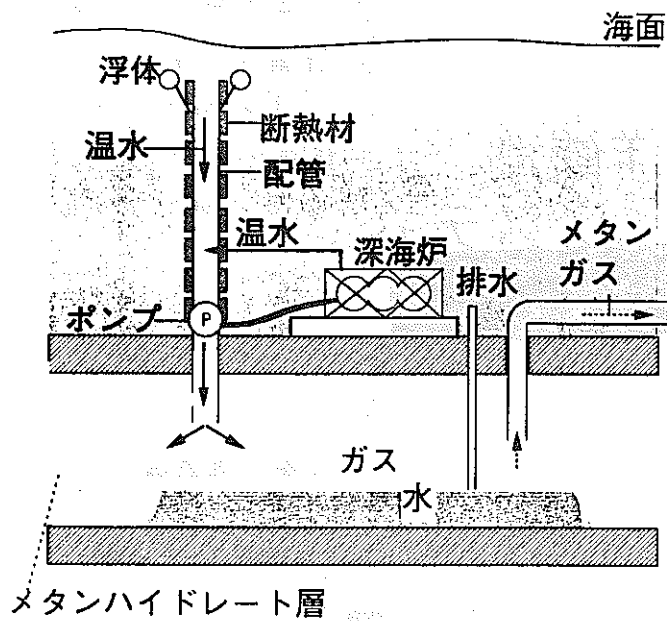
今回開発された気候モデルでは、大気と海洋との相互作用プログラムが改善され、海水の分布や厚さがより現実的に再現できた。またエルニーニョ現象に似た海水温の年々の変動の再現に全地球モデルではじめて成功するなど、実際の観測結果に近いモデルとなった。

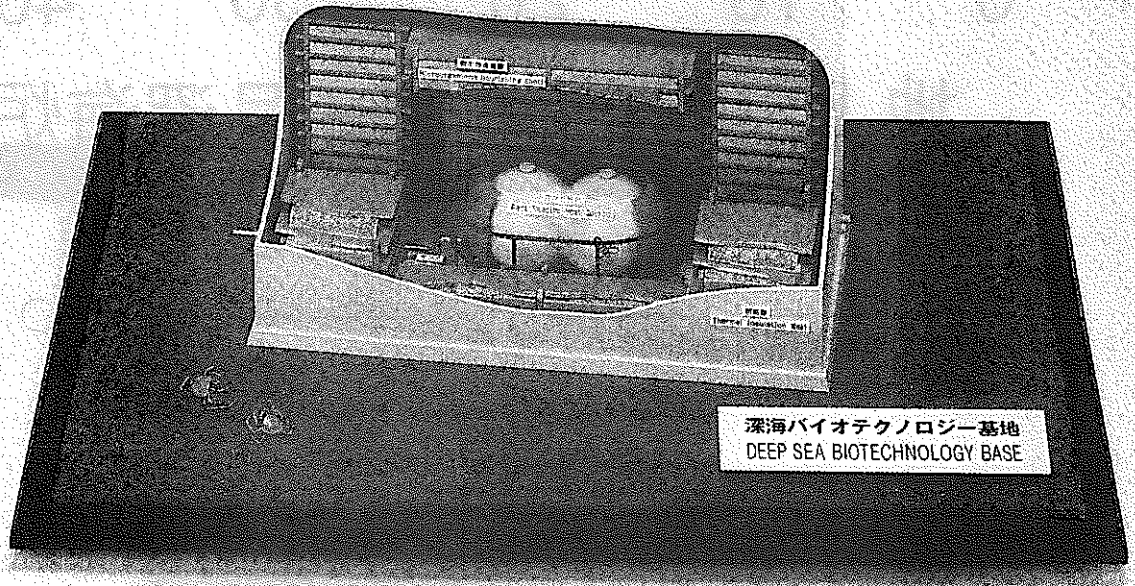
予測では1985年を基準にして、二酸化炭素濃度が年間1%ずつ上昇すると想定した。スーパーコンピュータを使って大気循環は5分、海洋循環は30分単位で計算した。約1年かかって二酸化炭素濃度が一定の場合、上昇する場合を50年分計算し、両者の差から50年後の気温上昇を予測した。





深海炭酸ガス貯蔵所





年 0 10 20 30 40

地上試験炉

設計 製作 試験

第一号深海炉

設計製作試験



深海炉スケジュール

おわりに

1. 可搬型深海炉の概念構築をした。
2. 深海（水中）用原子力動力源は原子力長計第4部会報告書で、海洋開発への貢献が期待されている。
3. 深海炉は海洋学者の期待が非常に大きい。

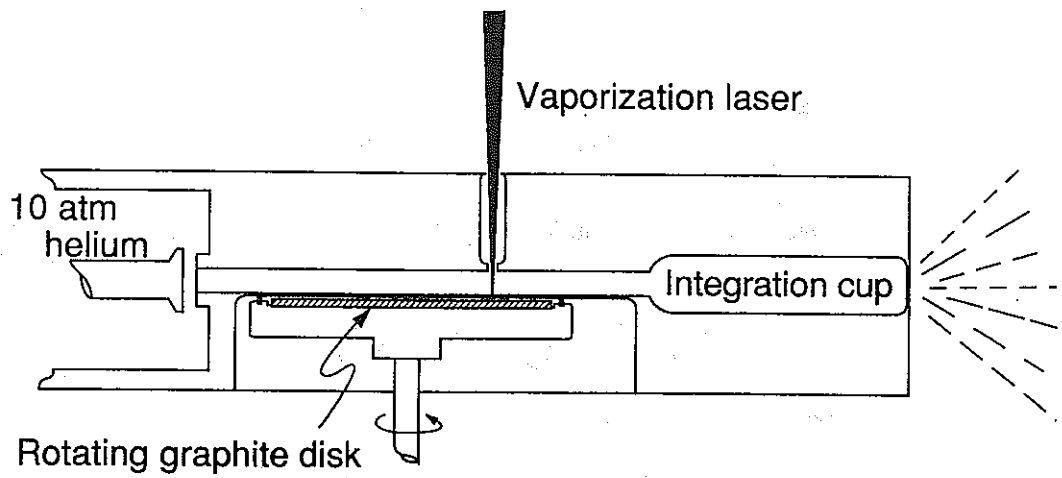
(5) フラーレンに関する研究

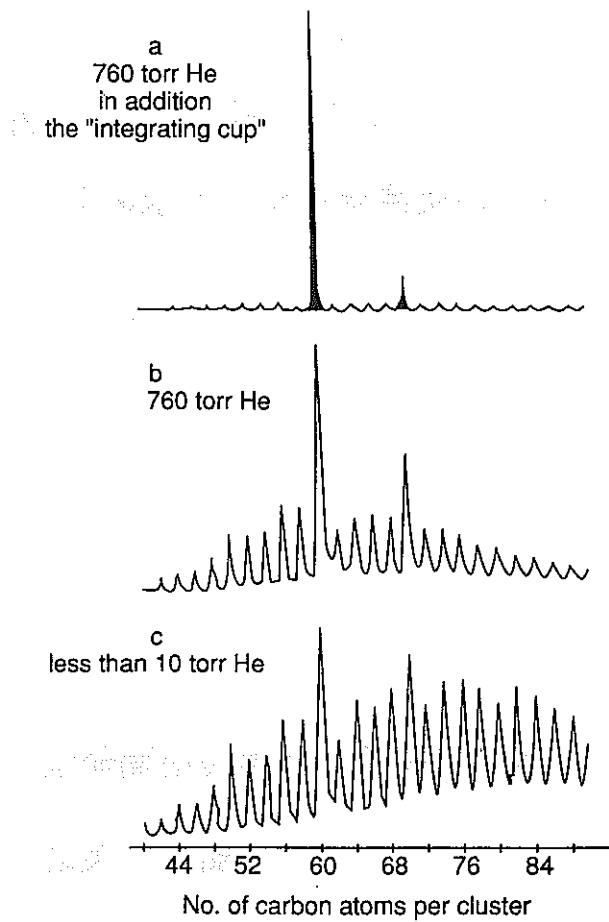
フラーレンに関する研究

—新しい炭素機能材料を求めて—

東海事業所 先端技術開発室

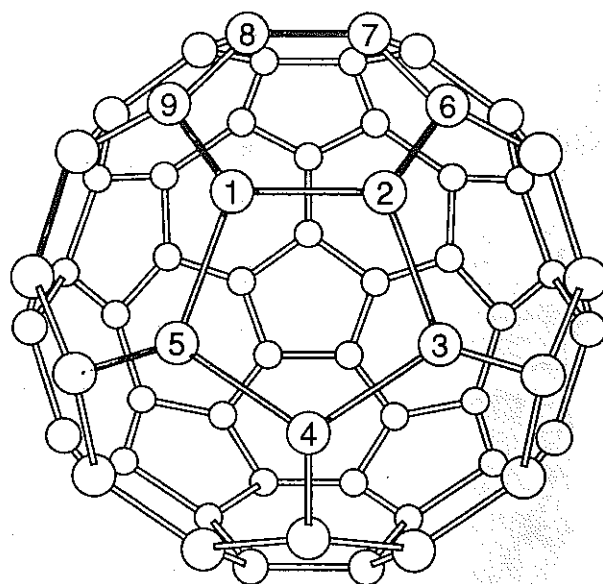
船坂 英之



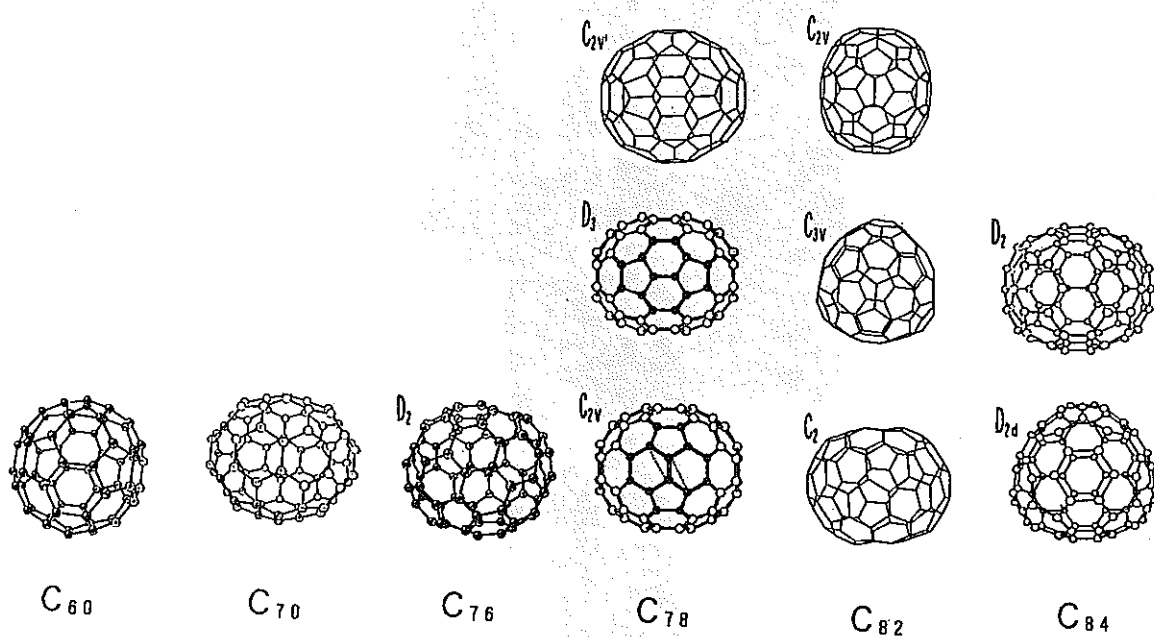


フラーレン研究の軌跡

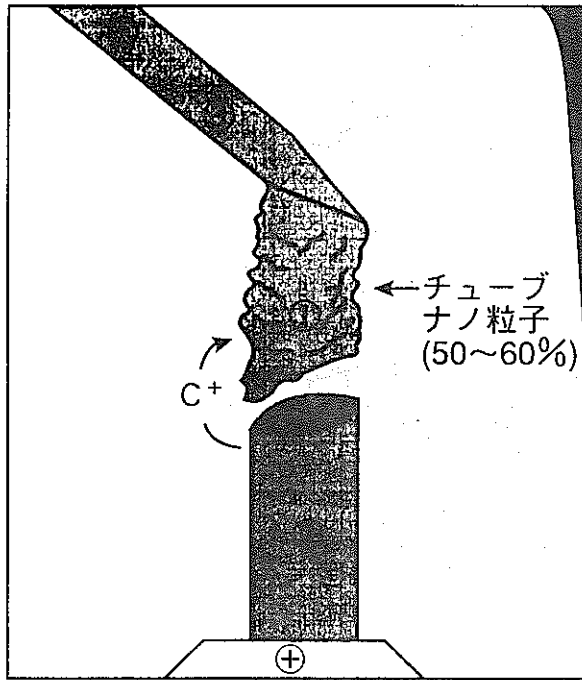
1970	・大澤映二がサッカーボール型炭素分子 C_{60} の存在を提唱。
1985	・サッカーボール型炭素分子 C_{60} の発見 (Kroto, Smalley)らがレーザー蒸発装置により、炭素クラスター合成試験を行う。
1990	・Kratschmer, Huffmanらによる、 C_{60} の大量合成法の発見。 ・化学修飾された C_{60} のX線回折法による分子構造の決定(C_{60} のサッカーボール形状の確認)。
1991	・La元素を用いて、金属内包フラーレンの生成を確認。 ・アルカリ金属ドーピングによる、 C_{60} の超電導特性の発見 (AT&T Bell研)。 ・カーボンナノチューブ、ナノ粒子の発見。
1992	・ウラン (U) 内包フラーレン ($U@C_{28}$) の合成の成功。 ・カーボンオニオンの合成の成功。 ・La元素を用いて、元素内包ナノ粒子の合成の報告。
1993	・単層ナノチューブの合成の報告。



C_1-C_2 1.46Å 5員環 12
 C_2-C_6 1.40Å 6員環 20
 Nuclear diameter 7.11Å
 Electronic diameter 10.0Å



各種フラーレンの異性体



← フラーレン含有すす
(生成されたすす中の
約15%がフラーレン)

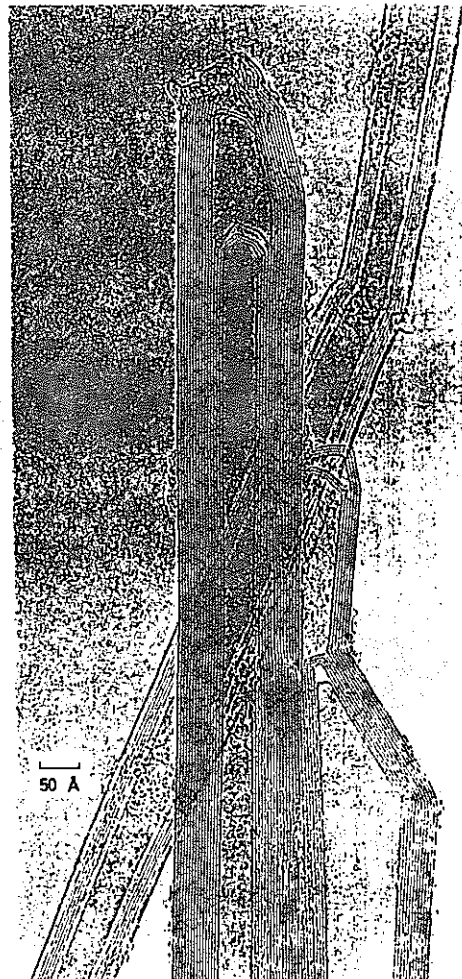
← チューブ
ナノ粒子
(50~60%)

C+

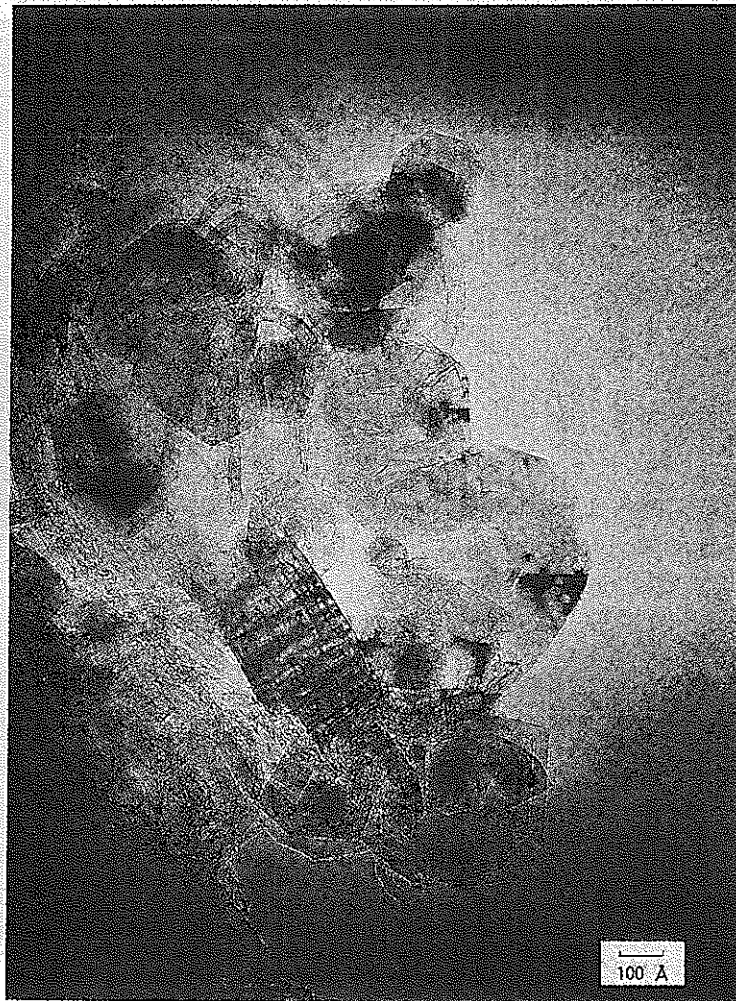
- ① アーク放電後、陰極堆積物
- ② グラファイト電極 (陽極)
- ③ グラファイト電極 (陰極)

※①の内部にナノ粒子及び
ナノチューブが生成する。

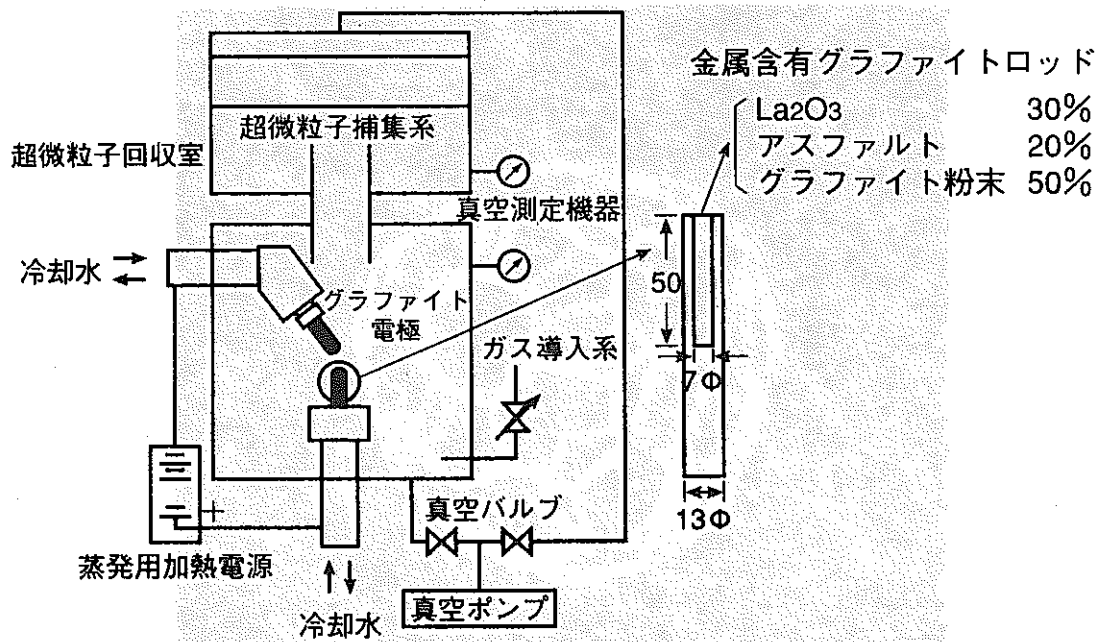
アーク放電終了直後の電極



ナノチューブの高分解能透過型電子顕微鏡観察結果



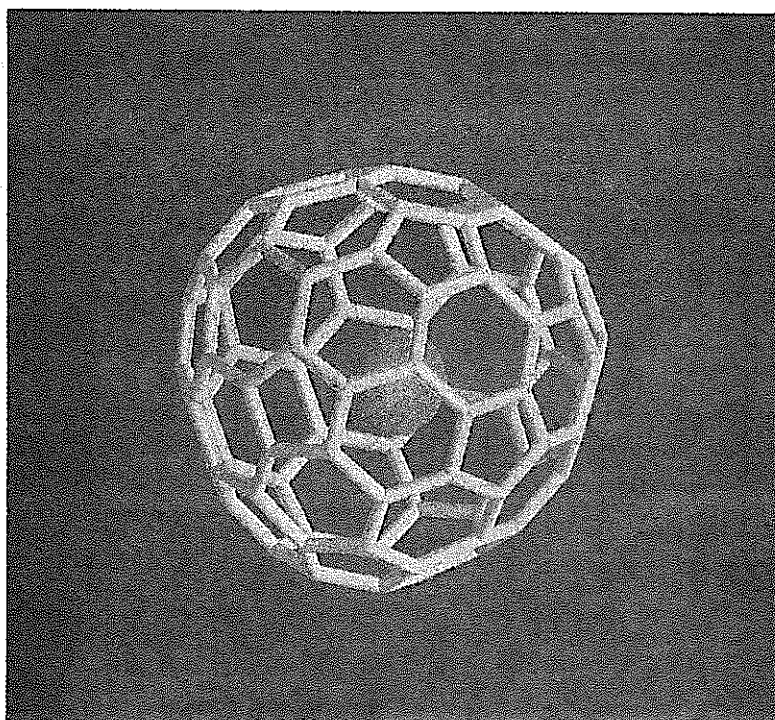
ナノ粒子の高分解能透過型電子顕微鏡観察結果



フラーレン製造装置



Figure III-1-3 (a) High-resolution TEM image of a carbon nanoparticle filled with La (metal). The dark region in the core is a single crystal of La, and a void is also observed.



金属内包フラーレン La@C82

研究目的

アクチニド元素やランタニド金属を内包したナノ粒子やフラーレンを作製し、新たな機能材料の合成をめざす

(1) アクチニド元素内包ナノ粒子の合成に関する研究

(2) ランタニド金属内包フラーレンの分離精製に関する研究

微細結晶内包ナノ粒子が作製されている元素

Li	Be											B	C	N	O	F	Ne															
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar															
K	Ca	Sc _C	Ti _C	V _C	Cr _C	Mn	Fe _{M,C}	Co _{M,C}	Ni _{M,ΔC}	Cu _M	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr															
Rb	Sr	Y _C	Zr _C	Nb	Mo _C	Tc	Ru	Rh	Pd _{ΔM}	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	X															
Cs	Ba	ランタン系	Hf _C	Ta _C	W _{ΔC}	Re	Os	Ir	Pt	Au _M	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn															
Fr	Ra	Ac	Th _C	Pa	U _C	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>La_C</td><td>Ce_C</td><td>Pr_C</td><td>Nd_C</td><td>Pm</td><td>Sm</td><td>Eu</td><td>Gd_C</td><td>Tb_C</td><td>Dy_C</td><td>Ho_C</td><td>Er_C</td><td>Tm_{ΔC}</td><td>Yb</td><td>Lu_C</td> </tr> </table>																		La _C	Ce _C	Pr _C	Nd _C	Pm	Sm	Eu	Gd _C	Tb _C	Dy _C	Ho _C	Er _C	Tm _{ΔC}	Yb	Lu _C
La _C	Ce _C	Pr _C	Nd _C	Pm	Sm	Eu	Gd _C	Tb _C	Dy _C	Ho _C	Er _C	Tm _{ΔC}	Yb	Lu _C																		

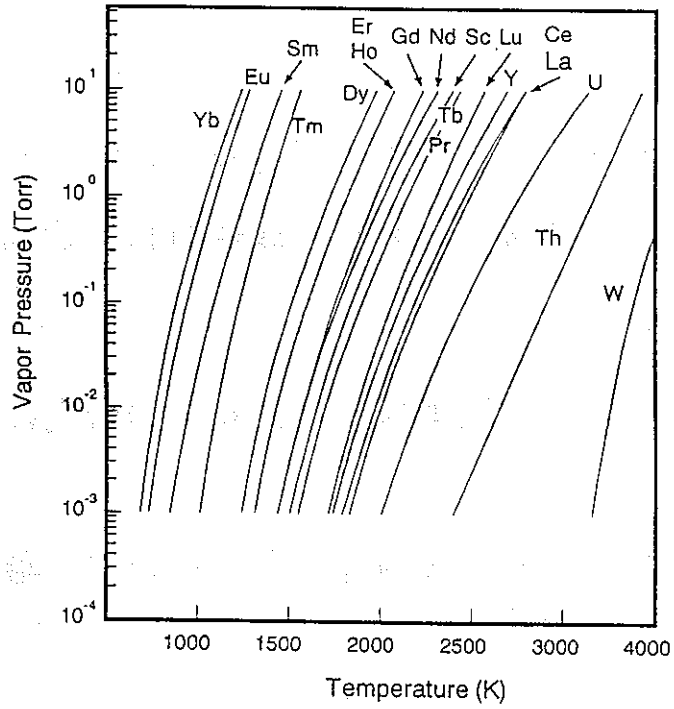
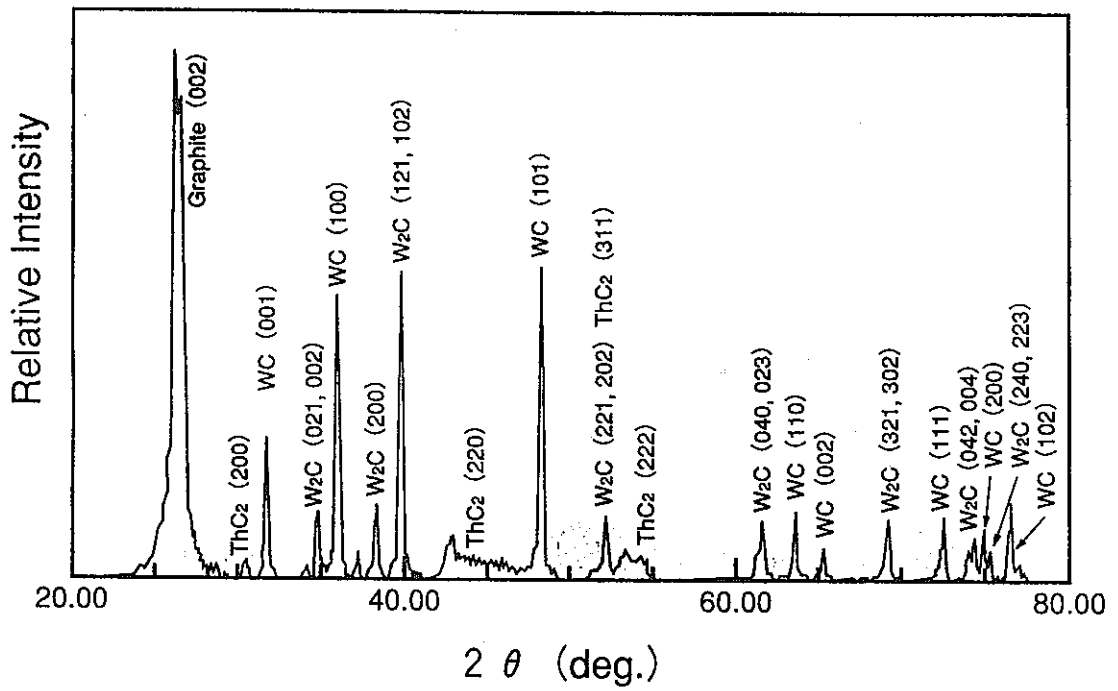


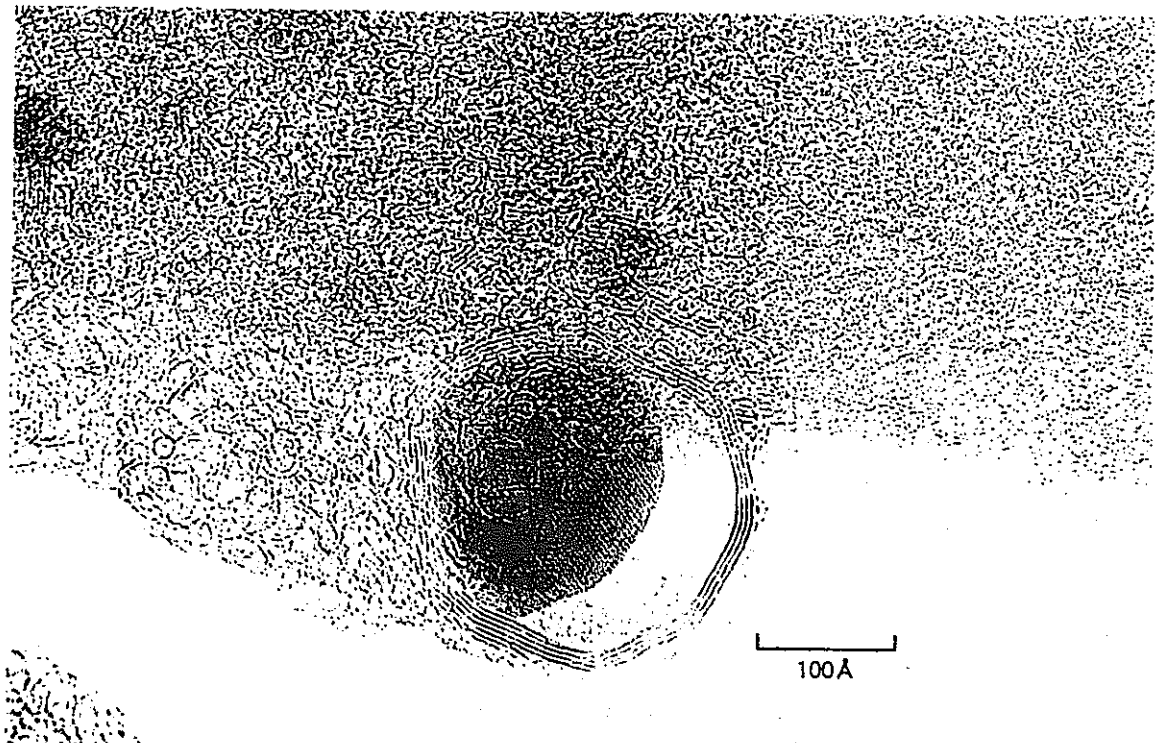
Figure III-2-8 Vapor pressure curves of rare-earth metals, appending U, Th and W which are noticed in this study.



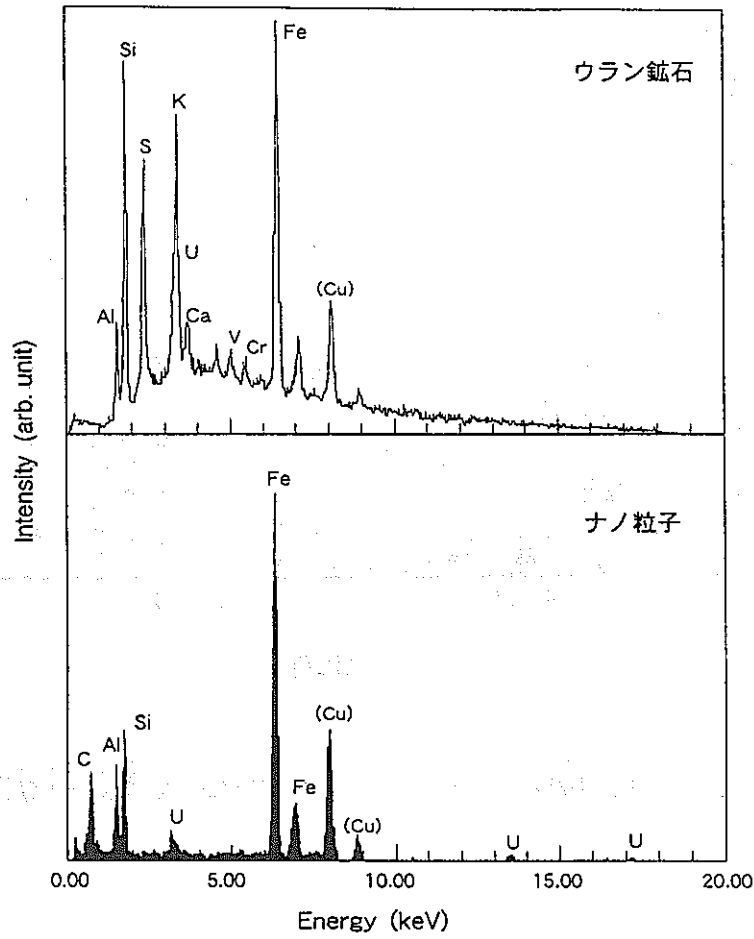
Th-W炭化物内包ナノ粒子の高分解能透過型電子顕微鏡像



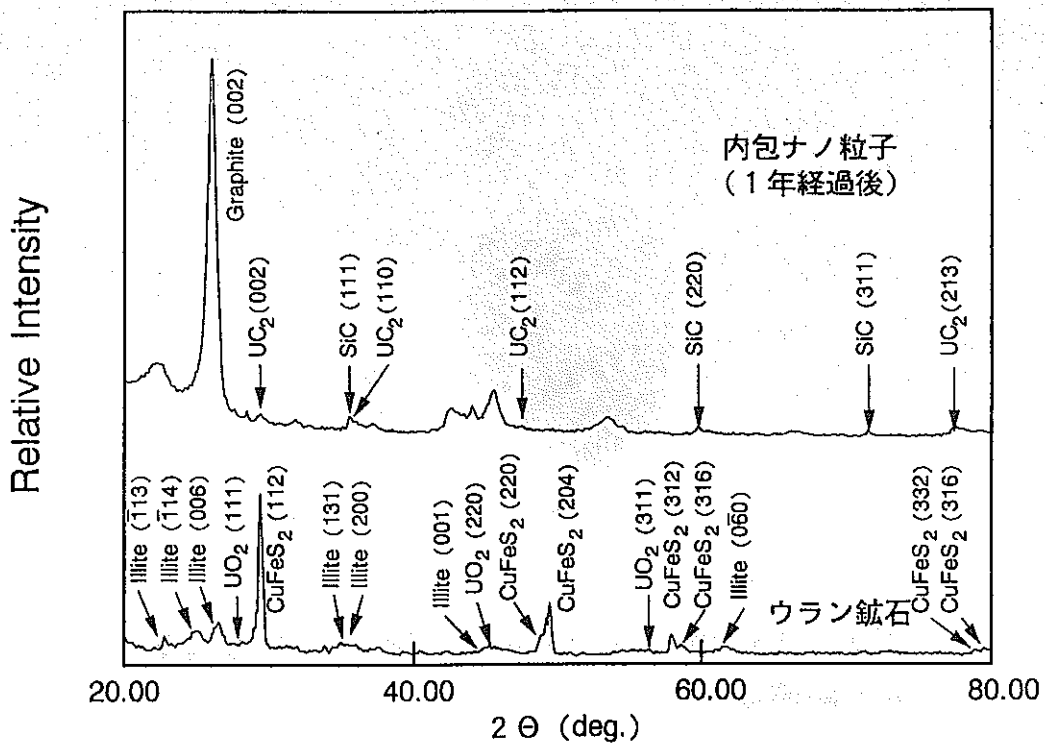
Th-W 炭化物内包ナノ粒子のX線回折結果



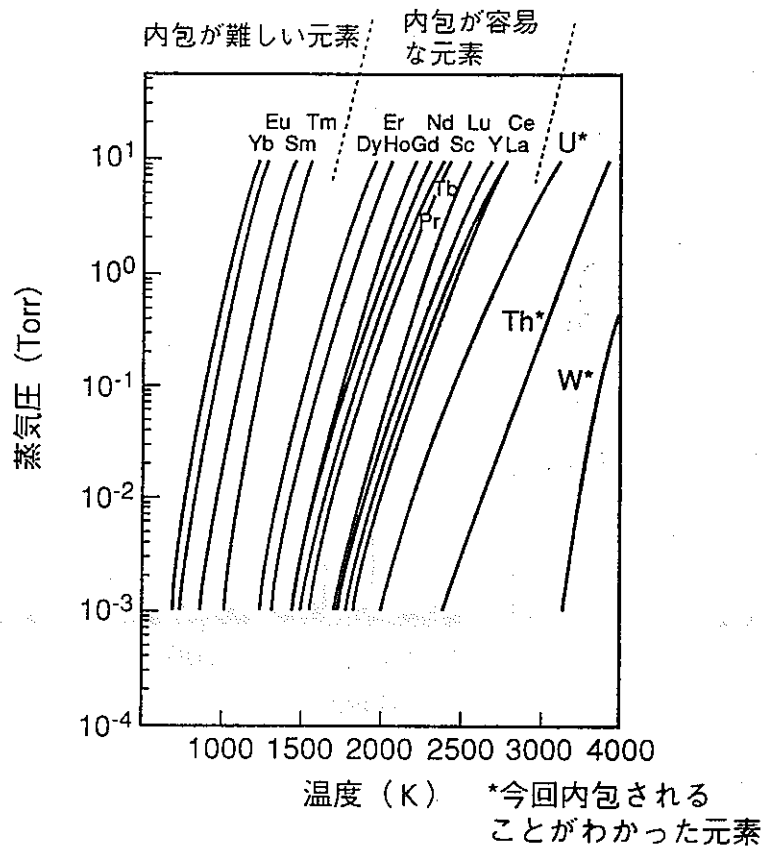
ウラン炭化物内包ナノ粒子の高分解能透過型電子顕微鏡像



エネルギー分散型X線 微小分析測定結果



X線回折結果

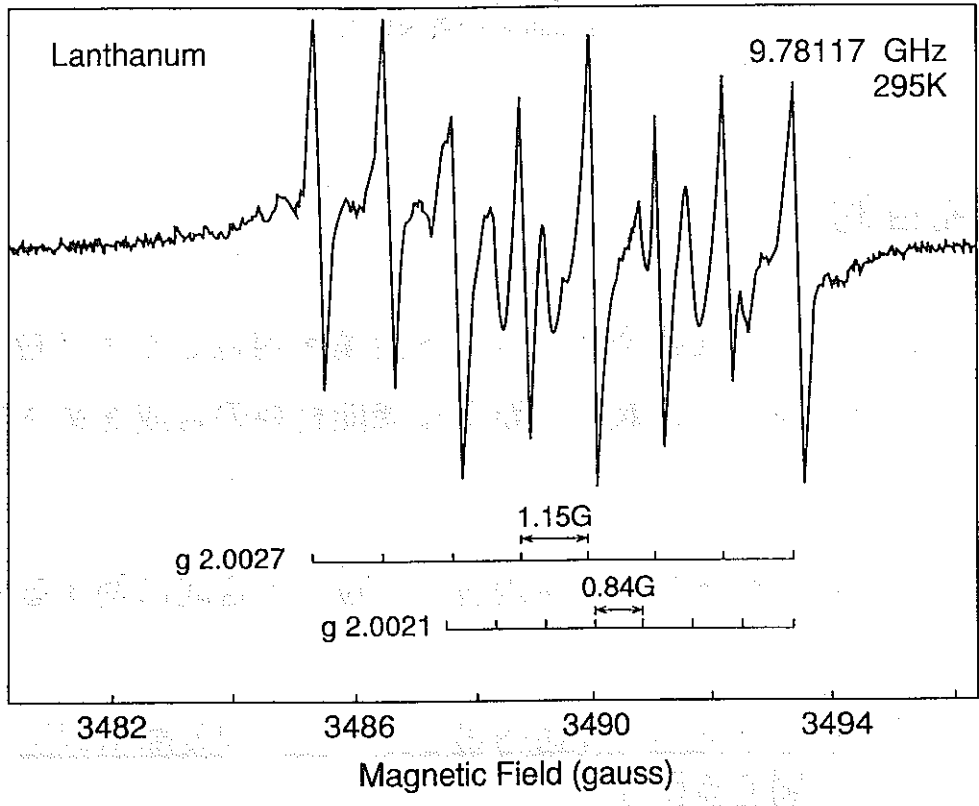
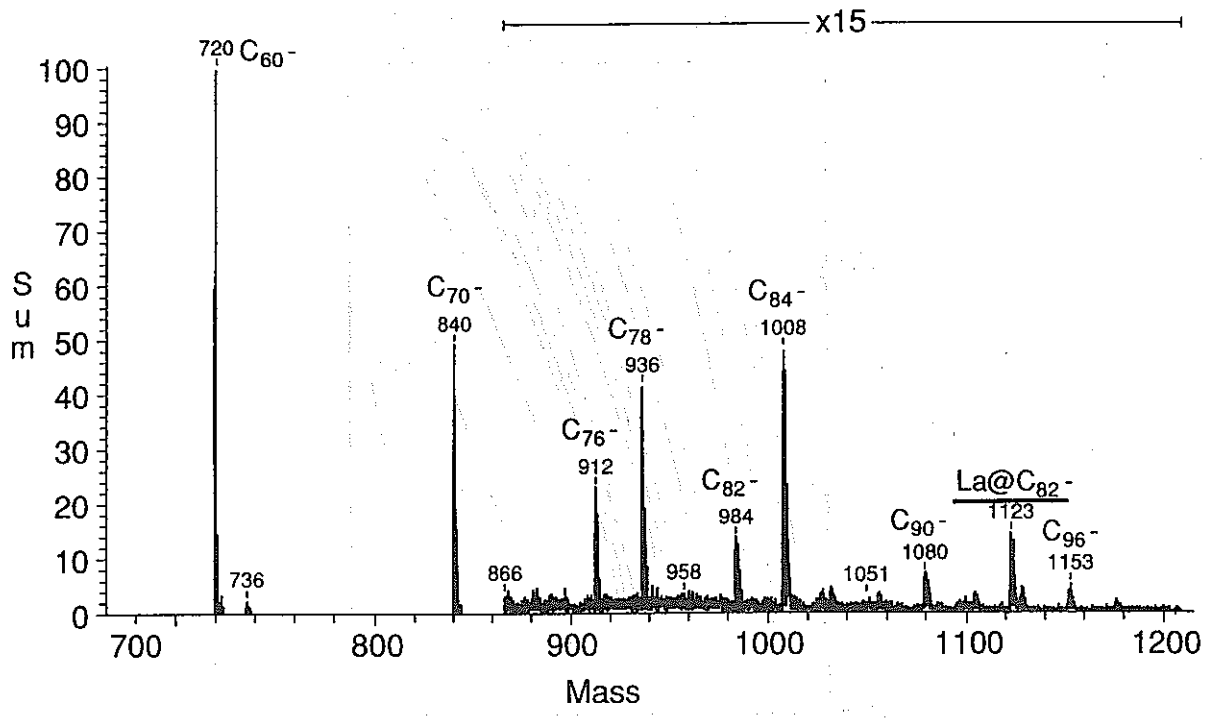


金属の蒸気圧

研究目的

アクチニド元素やランタニド金属を内包したナノ粒子やフラーレンを作製し、新たな機能材料の合成をめざす

- (1) アクチニド元素内包ナノ粒子の合成に関する研究
- (2) ランタニド金属内包フラーレンの分離精製に関する研究



EPR spectrum of La containing fullerenes

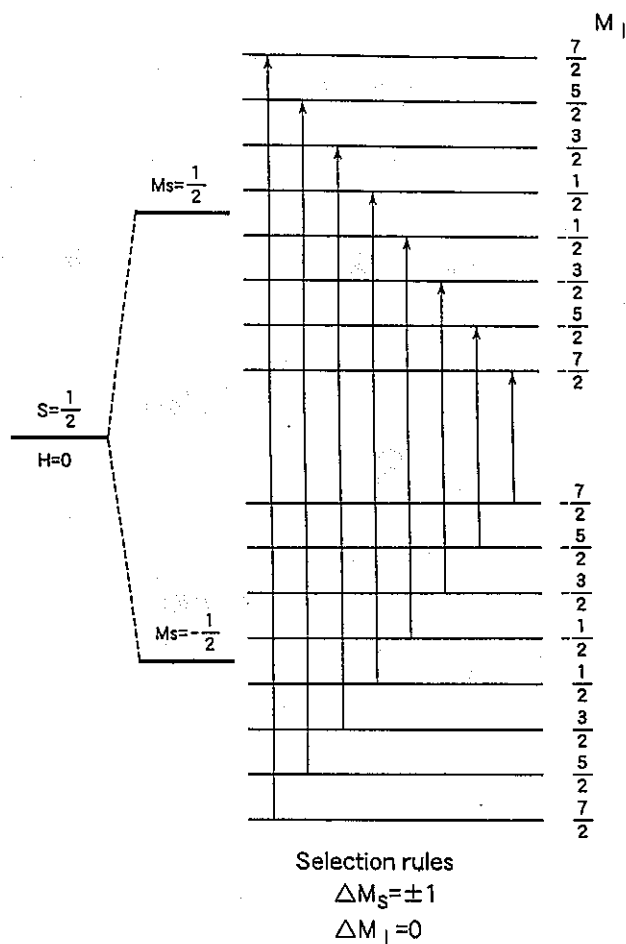
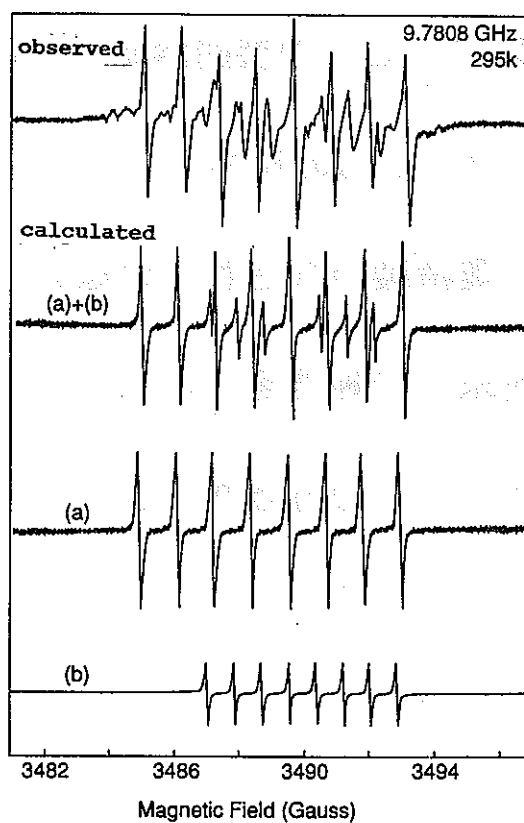


Figure II-1-3 Energy-level diagram for the hyperfine interaction of an electron with nucleus having $I = 7/2$.

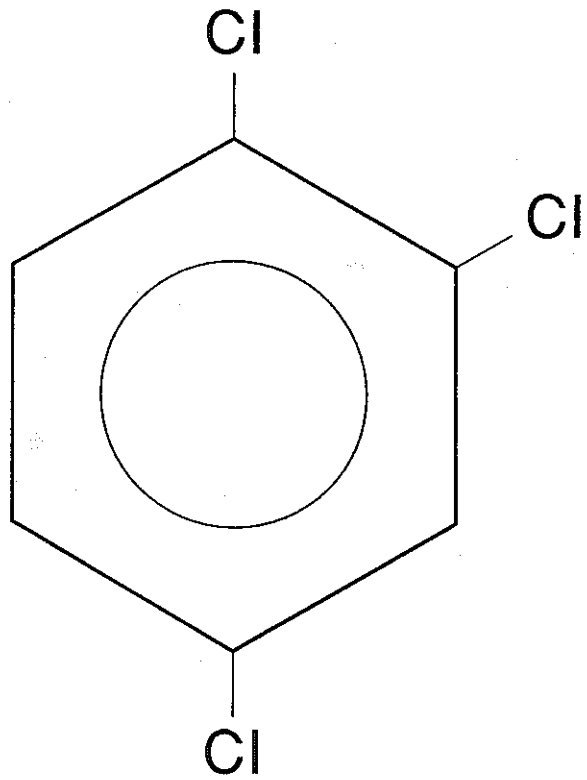


従来報告されていた金属内包フラーレンの分離精製

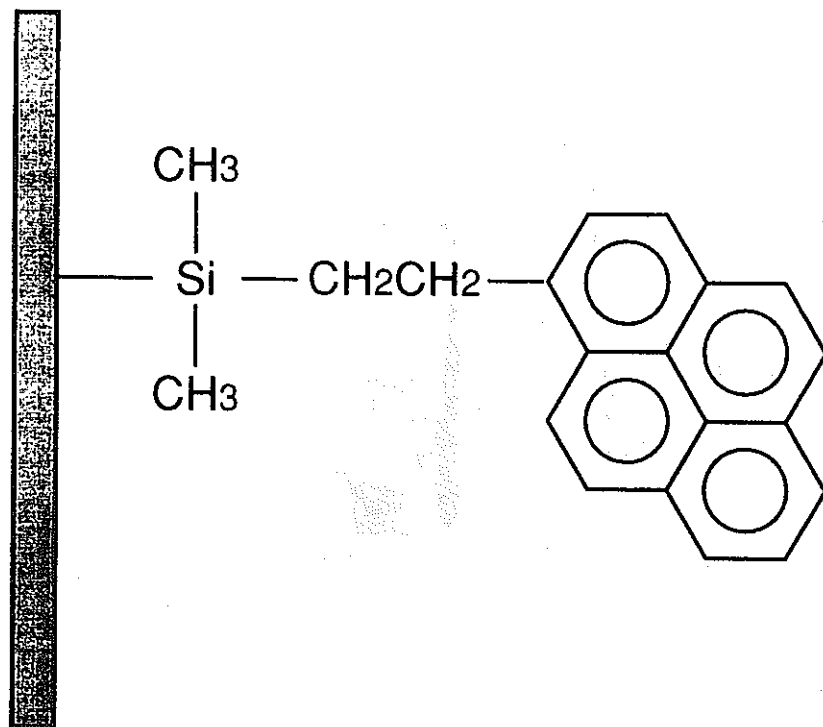
	抽出溶媒	分離方法
都立大 グループ 名古屋大	CS ₂	2段階HPLC ポリスチレンカラム/CS ₂ パークルカラム/トルエン
IBM グループ	CS ₂	2段階HPLC ポリスチレンカラム/トルエン+デカリン パークルカラム/トルエン+デカリン

問題点

- (1) 抽出溶媒, HPLCの展開溶媒としてCS₂を使用
- (2) 2段階HPLC法の採用
 - ・ 完全な分離精製がなされていない（異性体の分離）。
 - ・ 固相（粉末）の純度を上げることができない。
 - ・ グラムオーダーの分離ができない。



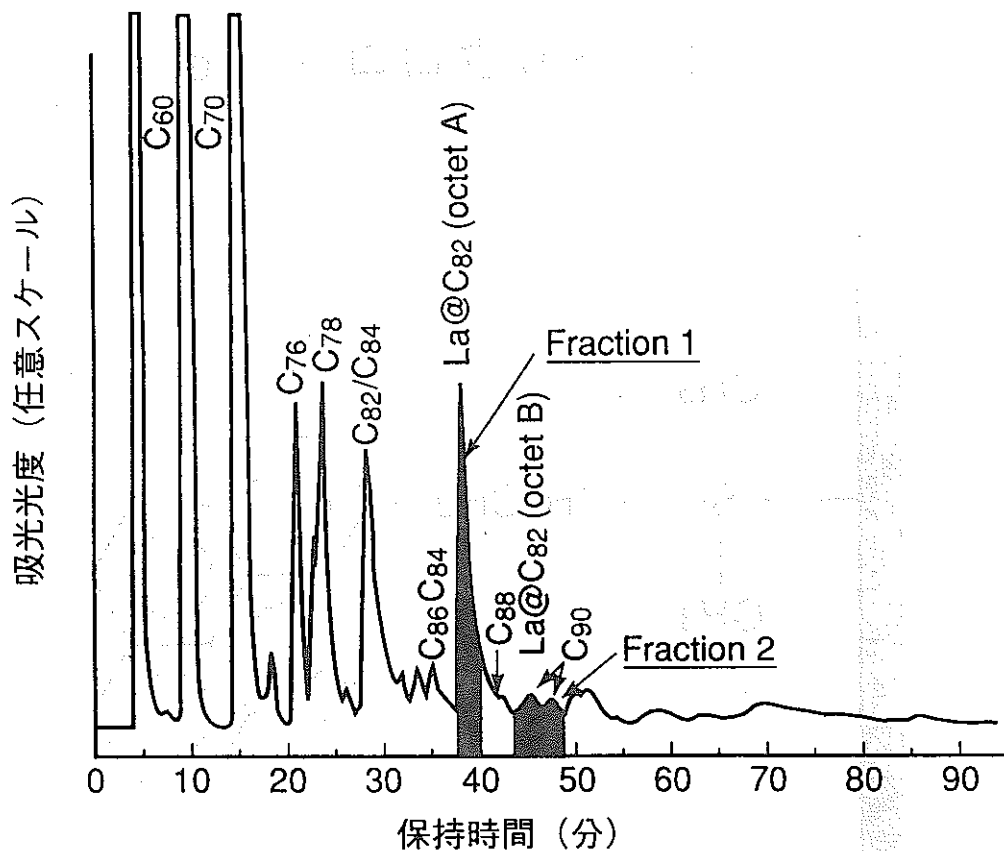
1,2,4-トリクロロベンゼン



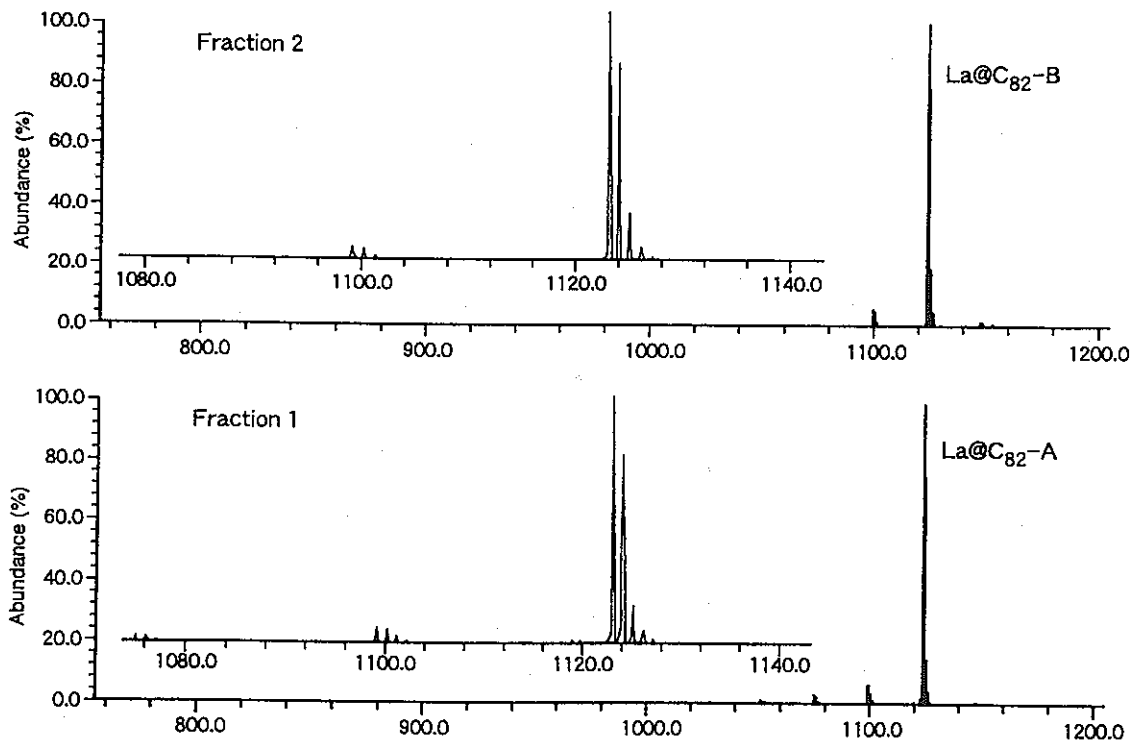
ピレンカラムの組成

PNCの開発した金属内包フラーレンの分離精製法

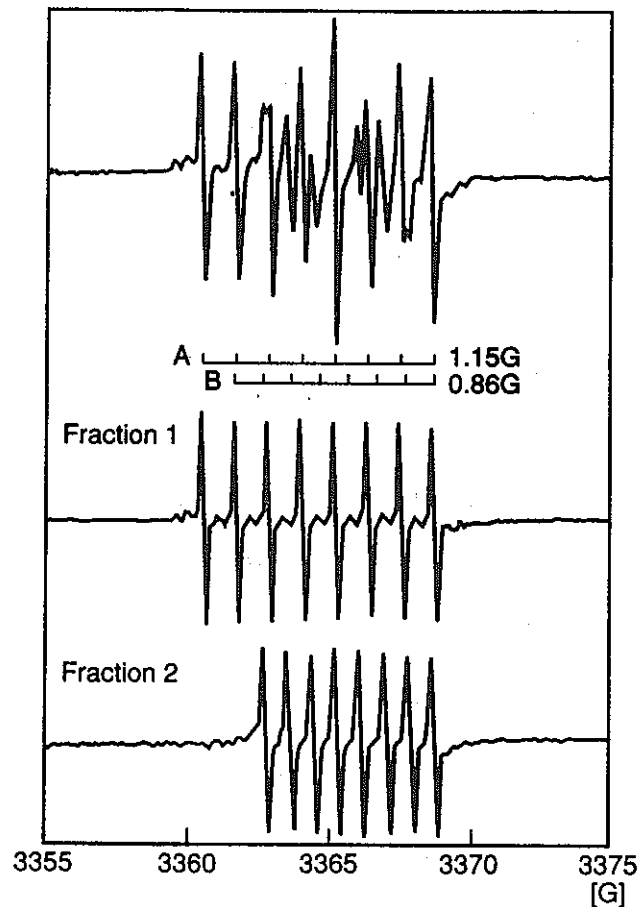
	抽出溶媒	分離法
PNC	1,2,4-トリクロロベンゼン	1段階 HPLC ピレンカラム/トルエン



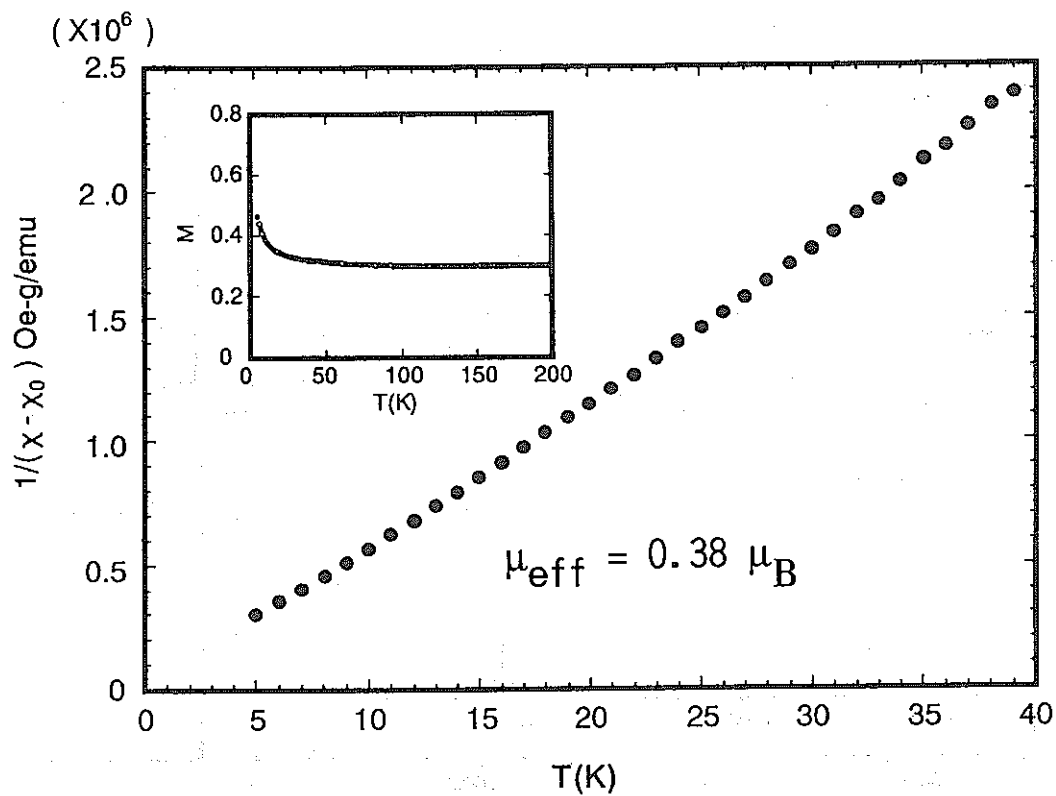
高速液体クロマトグラフィーによるフラーレンの分離



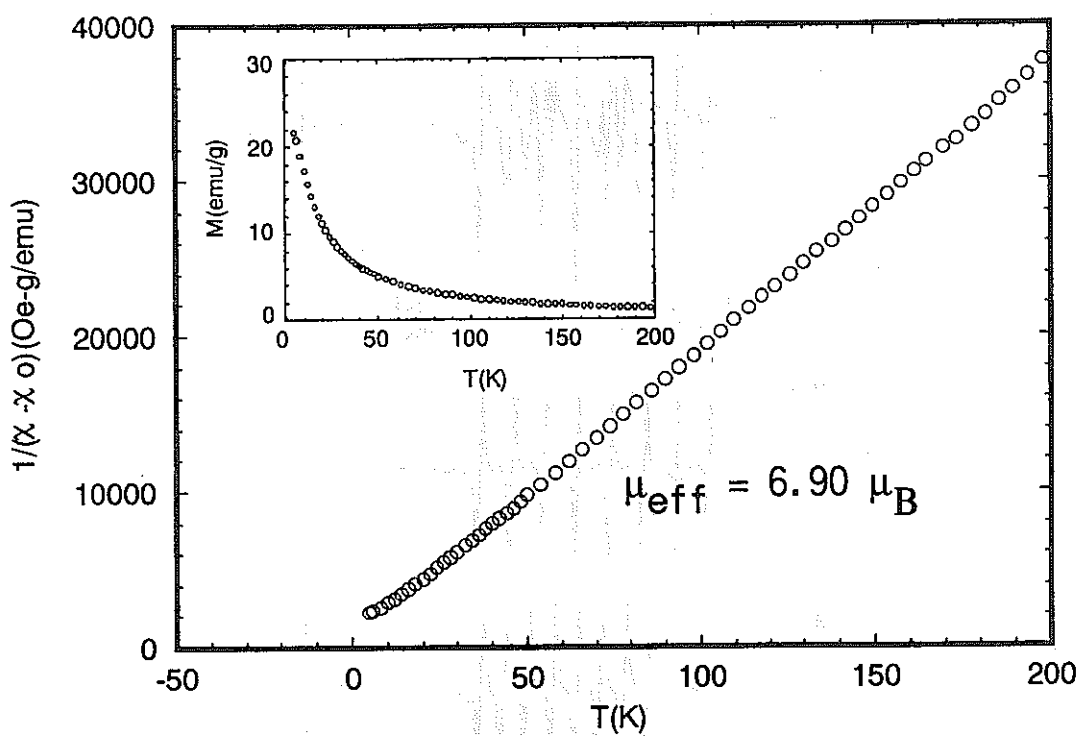
分離溶液の質量分析結果



分離溶液の電子スピン共鳴測定結果



分離精製したLa@C₈₂粉末の磁化率測定結果



分離精製したGd@C₈₂粉末の磁化率測定結果

分離精製したLa@C₈₂とGd@C₈₂の磁気特性測定結果

$$\text{La@C}_{82} \quad \mu_{\text{eff}} = 0.383 \mu_{\text{B}}, (n = 0.071)$$

$$\text{Gd@C}_{82} \quad \mu_{\text{eff}} = 6.90 \mu_{\text{B}}, J = 3.38$$

references

$$\text{Gd}_2\text{C}_3 \text{ナノ粒子} \quad \mu_{\text{eff}} = 8.28 \mu_{\text{B}}, J = 3.67 \text{ (実験値)}$$

$$\text{Gd}^{3+} \text{ free ion} \quad \mu_{\text{eff}} = 7.94 \mu_{\text{B}}, J = 3.5 \text{ (理論値)}$$

(基底状態)

結 論

- (1) アクチニド元素内包ナノ粒子の合成に関する研究
ウラン、トリウムを内包したナノ粒子の合成に初めて成功した。
またこれらの元素が炭化物の形で内包されることや合成されたナノ粒子が、大気中においても安定に存在することを明らかにした。
- (2) ランタニド金属内包フラーレンの分離精製に関する研究
ランタニド金属内包フラーレンのグラムオーダーの分離精製を実現した。またこれを試料として、磁気特性の測定等を実施した。

(6) 原子力用新材料の創製

原子力用新材料の創製

- 極限環境に耐える材料を目指して -

- (1) 高速炉用セラミックス
- (2) 高速炉用傾斜機能材
- (3) 高性能放射線遮蔽材
- (4) 高性能制御材

動燃事業団 大洗工学センター
基盤技術開発部 先進技術開発室
加納 茂樹

高速炉用セラミックスの創製

研究目標

- 金属材料以外の新素材の開発・適用による高速炉の高性能化を目標に、フロンティア材料研究のテーマとしてスタート
- シーズ指向型：セラミックスの性能・機能の把握
 - 高速炉用セラミックスの創製
 - ニーズへの対応

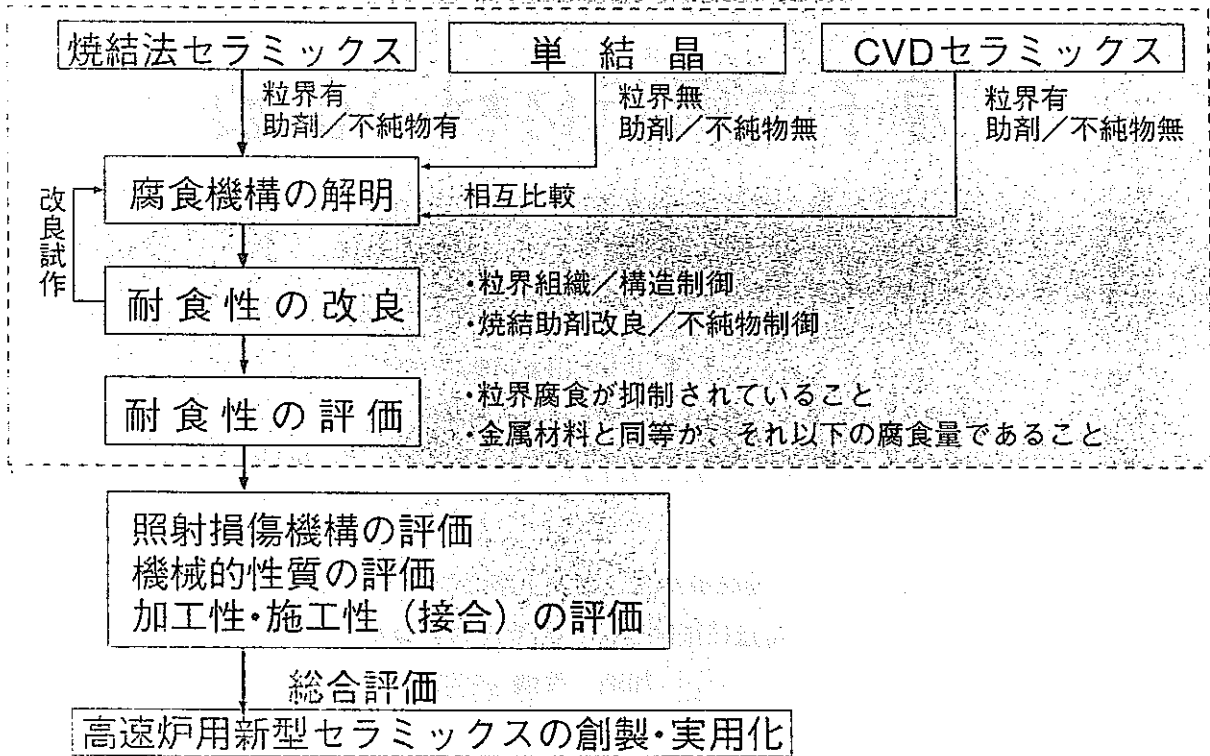
セラミックスの長所を活用 金属材料に比較して

- 高い高温強度
- 優れた耐熱性
- 低い熱膨張係数
- 優れた低摩擦・耐摩耗性
- 低密度 など

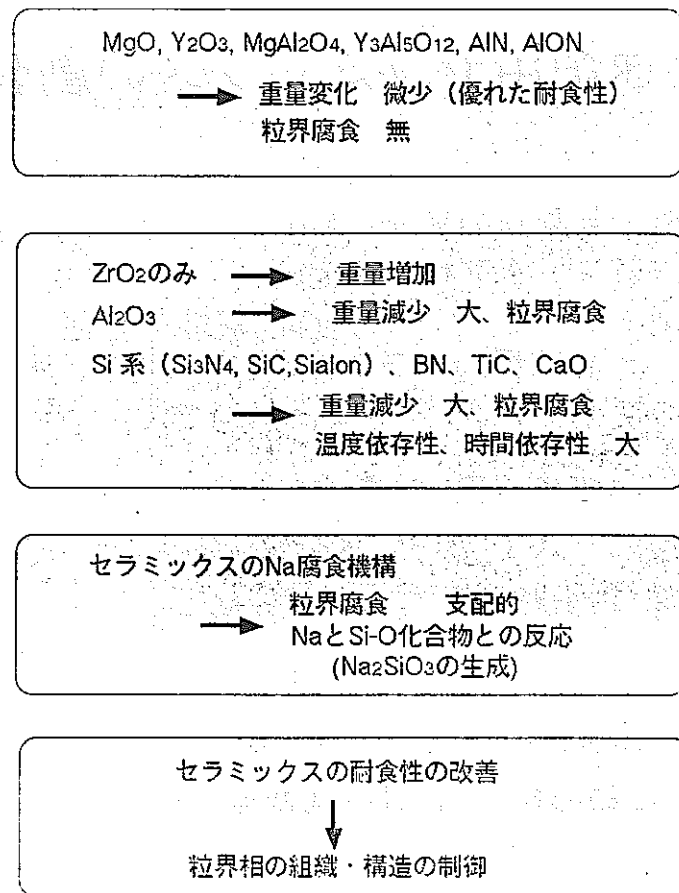
適用例

- 熱遮蔽板（熱応力緩和）
- 機器の接触・摺動部材（耐摩耗・低摩擦）など

研究アプローチ



ナトリウムに対する腐食挙動



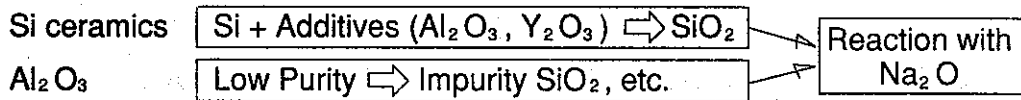
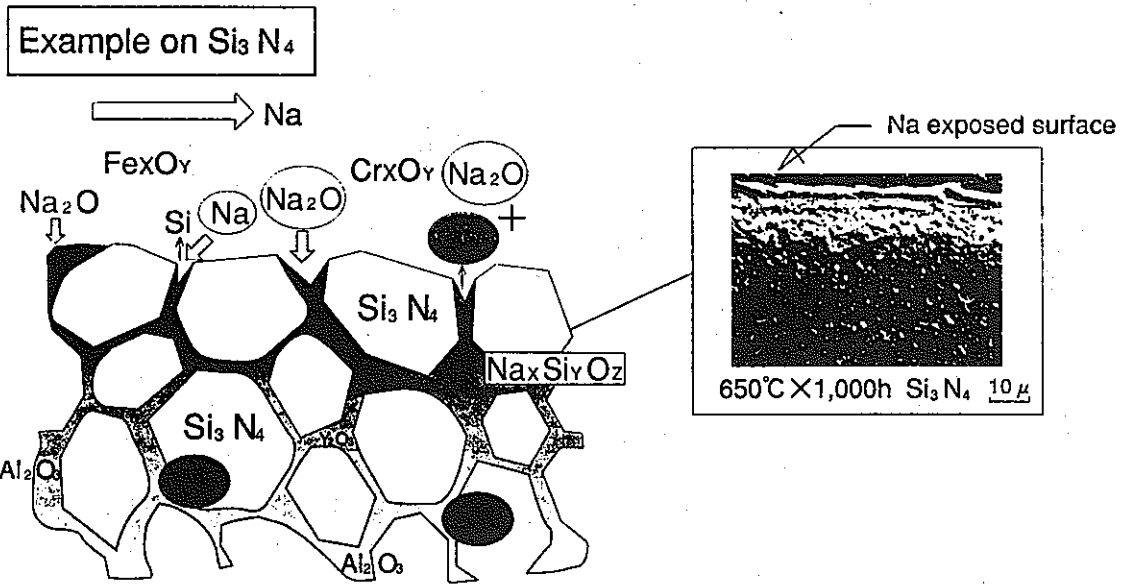


Fig.11 Schematic drawing of sodium corrosion mode on sintered ceramics

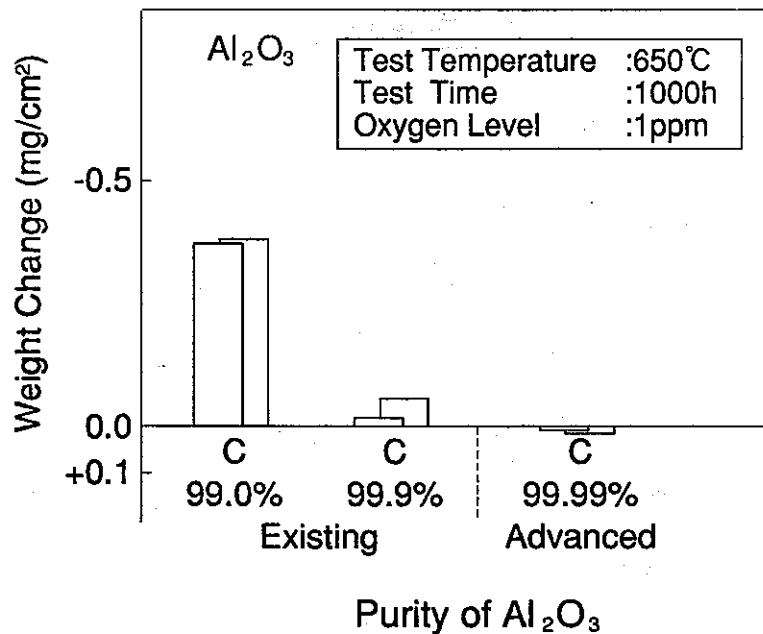


Fig.12 Comparison of weight change between existing and advanced Al_2O_3

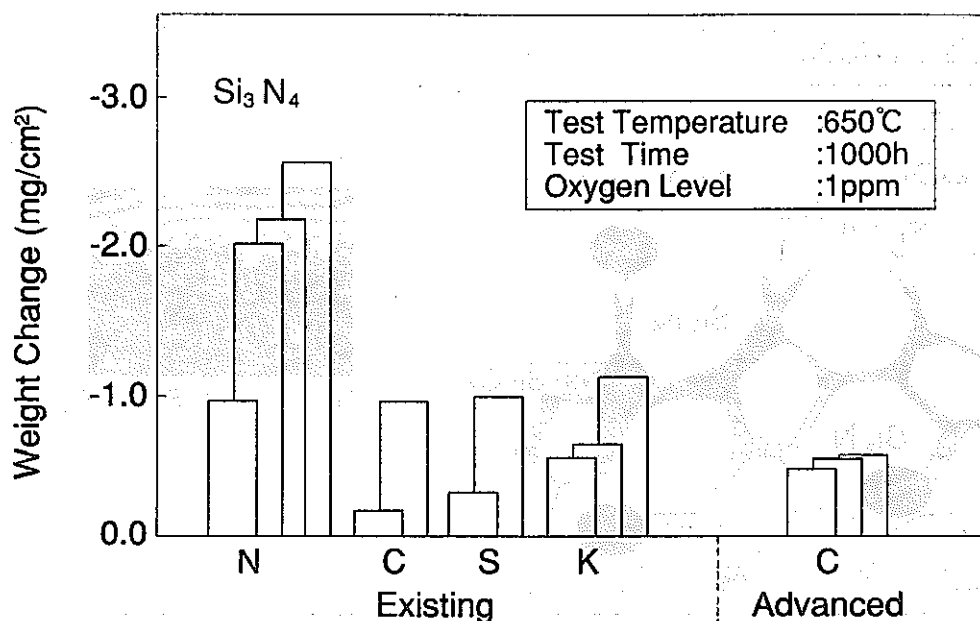
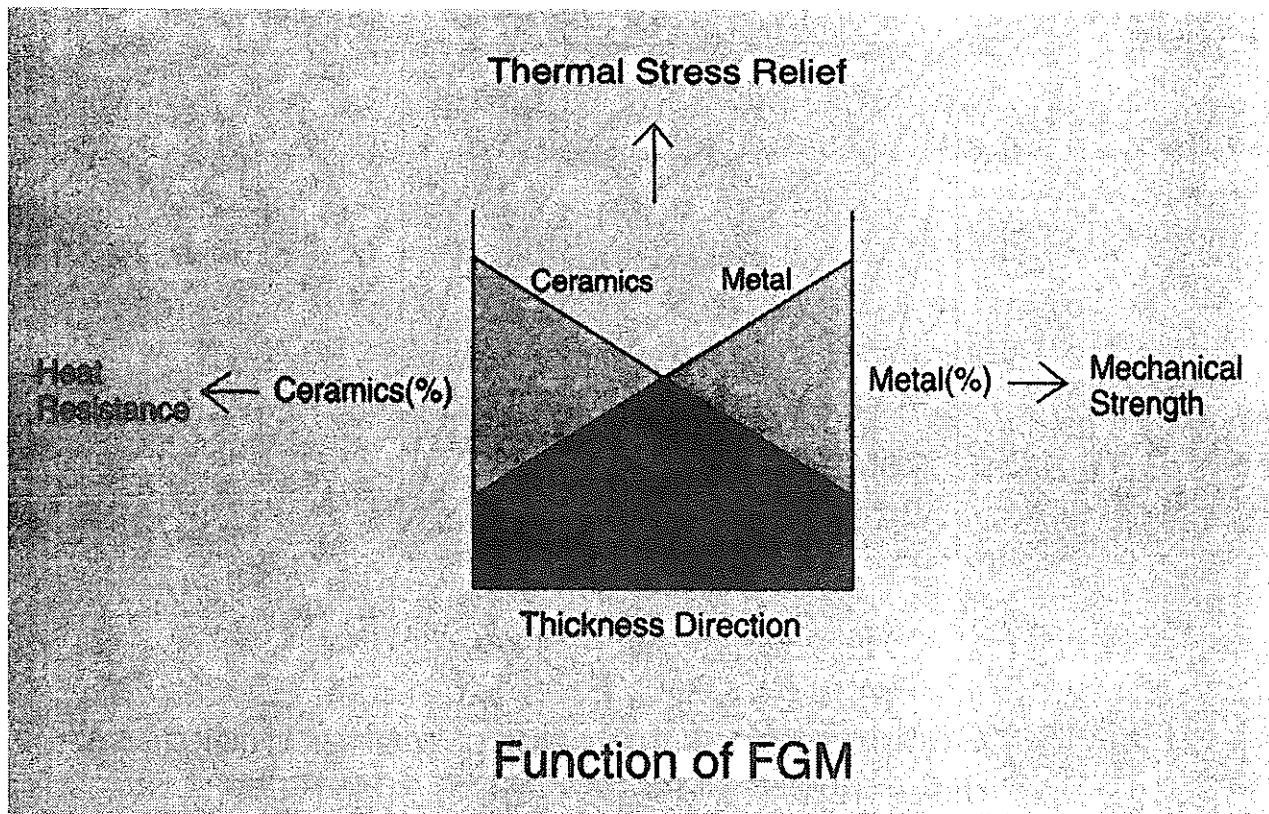


Fig.13 Comparison of weight change between existing and advanced Si₃N₄

まとめ

- ① セラミックスのナトリウムに対する腐食特性を評価した。
- ② 耐食性改良方策の検討により、高速炉ナトリウム環境で優れた耐食性を有するエンジニアリングセラミックス創製の見通しを得た。



高速炉用傾斜機能材(FGM)の創製

開発目的

- ・耐放射線性、耐Na性および耐熱性に優れるFGM開発に関する基盤技術の確立。
- ・高性能熱応力緩和材の創製

開発目標

- ・ FGMの最適設計法および創製法を確立し、FGM最適設計システムを構築する。
- ・ (最適設計法) : FINASによるFGM解析体系の確立→FGMの最適設計
- ・ (創製法) : 製造プロセスの選定、プロセス条件の最適化→最適組成傾斜FGMの試作

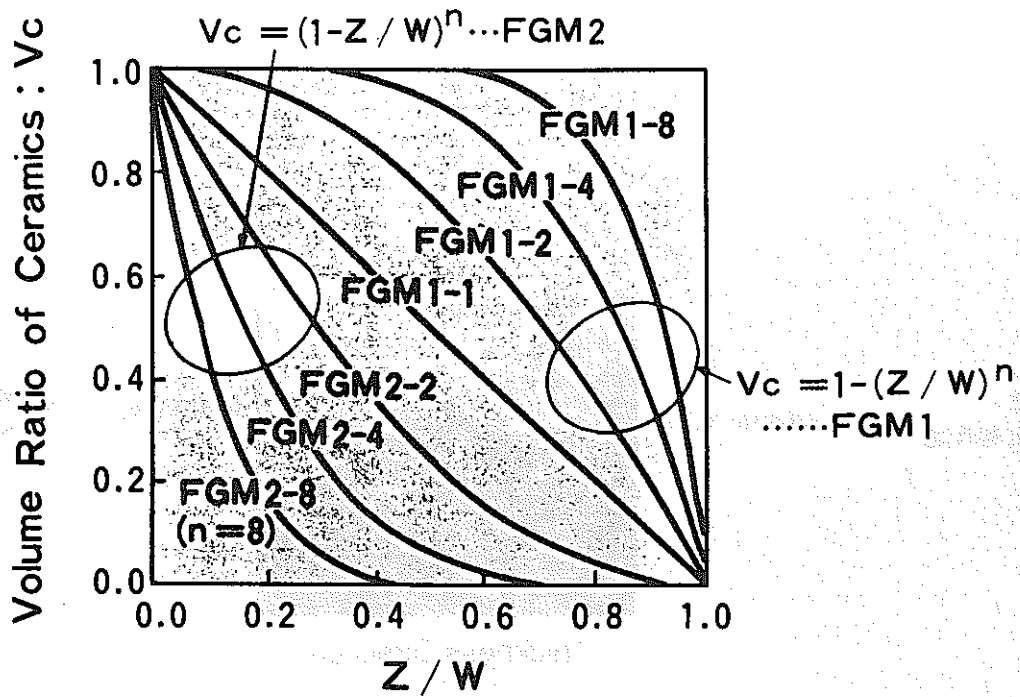
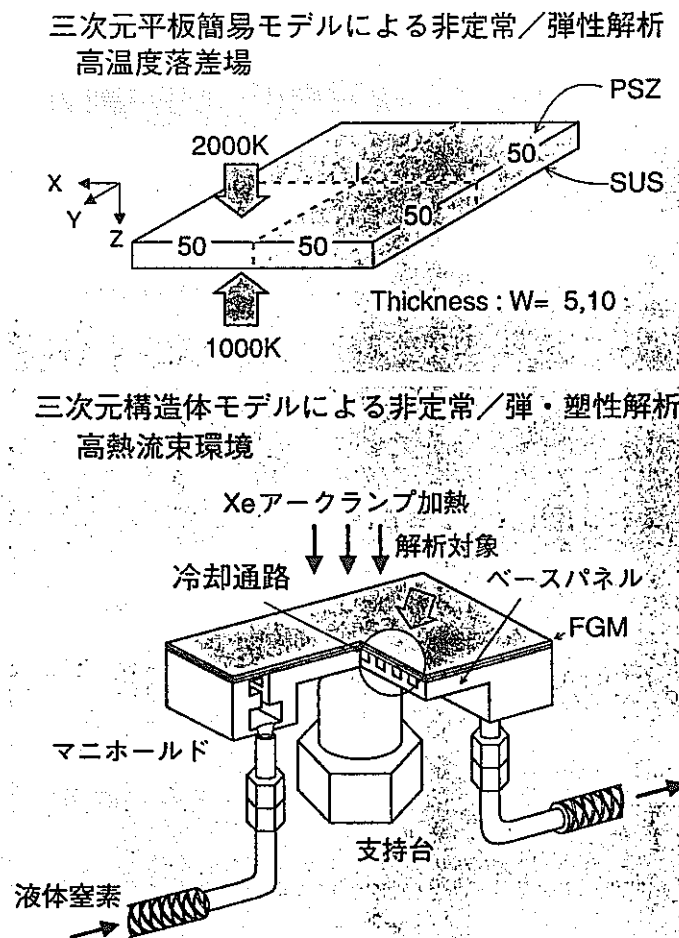
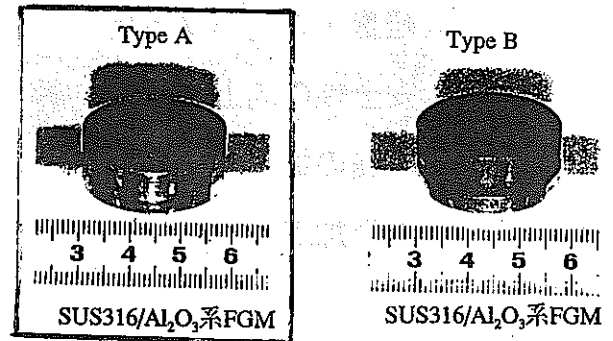
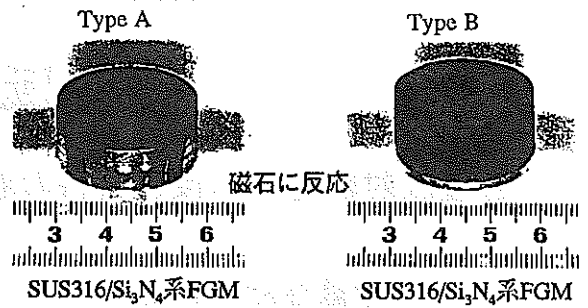


Fig. 15 Compositional functions along thickness direction for PSZ / SUS 304 FGM



《試作結果》

	Type A	Type B
Si ₃ N ₄	×	×
Al ₂ O ₃	○	×



材料設計—まとめ

- ① 熱応力解析により、高温度落差場においては遮熱性重視型 FGM が、高熱流束環境下においては熱伝達性能重視型 FGM が熱応力緩和の点で有利であることを明らかにした。
- ② 試験結果との比較により解析結果を検証し、FGM 層の亀裂の発生及び変形量が評価可能であることを明らかにした。
- ③ 解析プログラム FINAS による最適材料設計手法確立の見通しを得た。

製造プロセス—まとめ

- ① セラミックス成分の増加に伴う HLP 固化成型性の劣化
→ 機械加工時に亀裂発生
- ② プラズマ焼結法の検討・実施 → 試作に成功

高性能放射線遮蔽材の創製

研究目的

各種放射線遮蔽用複合材料の創製

- ・遮蔽性能の最適化 → 各種放射線環境に対して
- ・軽量・コンパクト化 → 成分・組成の最適化
- ・安全性の向上 → 耐熱性の向上
- ・用途の拡大
- ・成形加工性の向上 → 粉末冶金法の適用

研究課題と研究の流れ

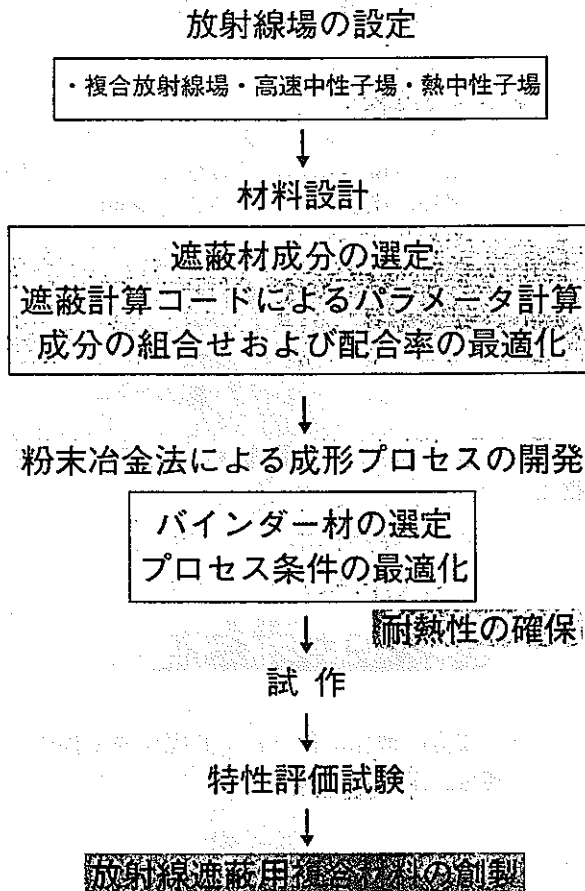
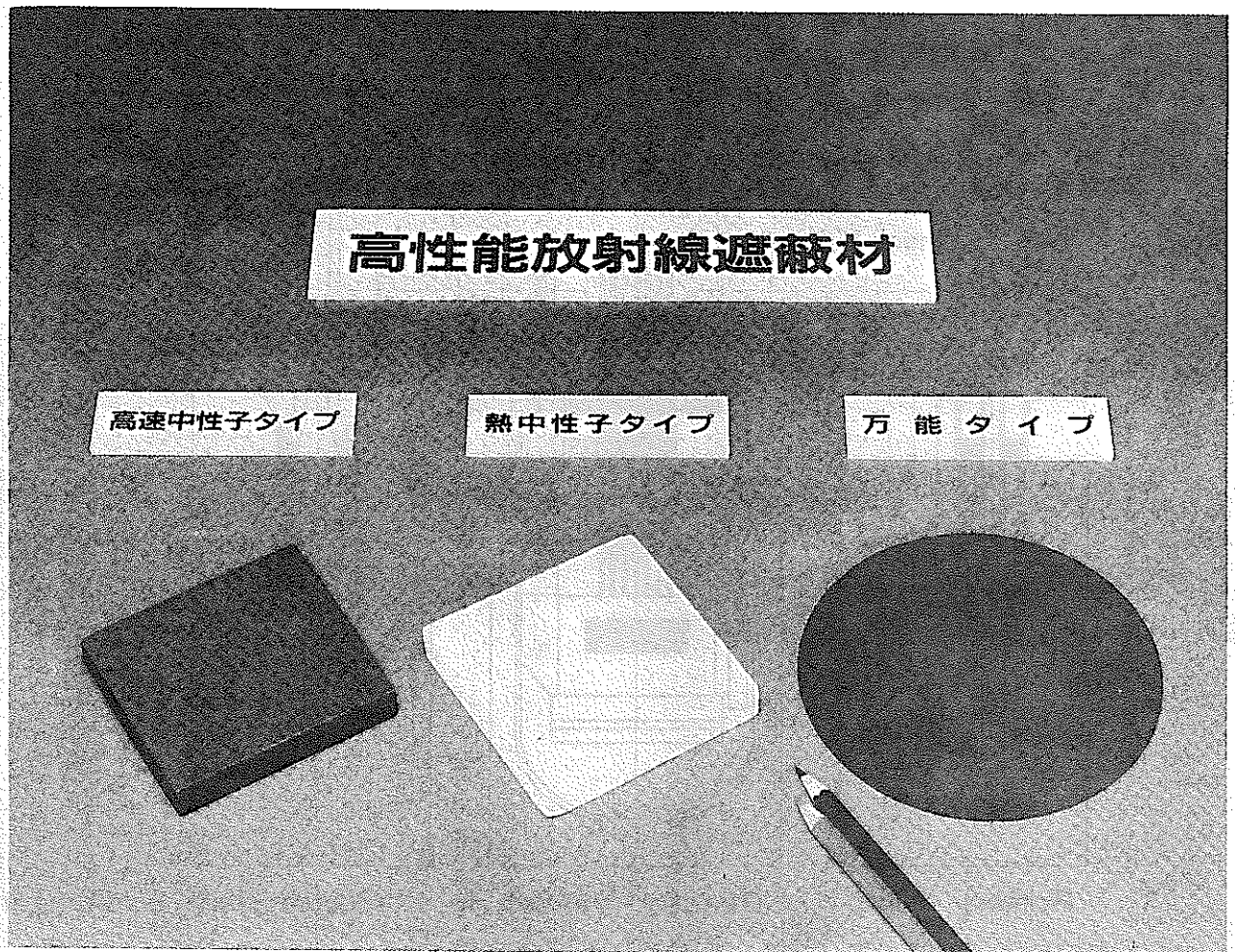


表 選定した試作材成分および配合比(vol%)

試作材	中性子遮蔽材			γ 線遮蔽材	バインダー材
複合放射線場用	C (40~70)		Gd ₂ O ₃ (30~10)	W (10)	Fe (10)
	ZrH ₂ (20~30)	B ₄ C (10)	Fe ₂ O ₃ (5)	WO ₃ (20~30)	Al ₄ (PO ₄) ₃ (45~25)
高速中性子場用	ZrH ₂ (40~80)			—	CaSiO ₃ (60~20)
	B ₄ C (40~80)			—	CaSiO ₃ (60~20)
熱中性子場用	Gd ₂ O ₃ (40~80)			—	陶磁器原料 (60~20)



まとめ

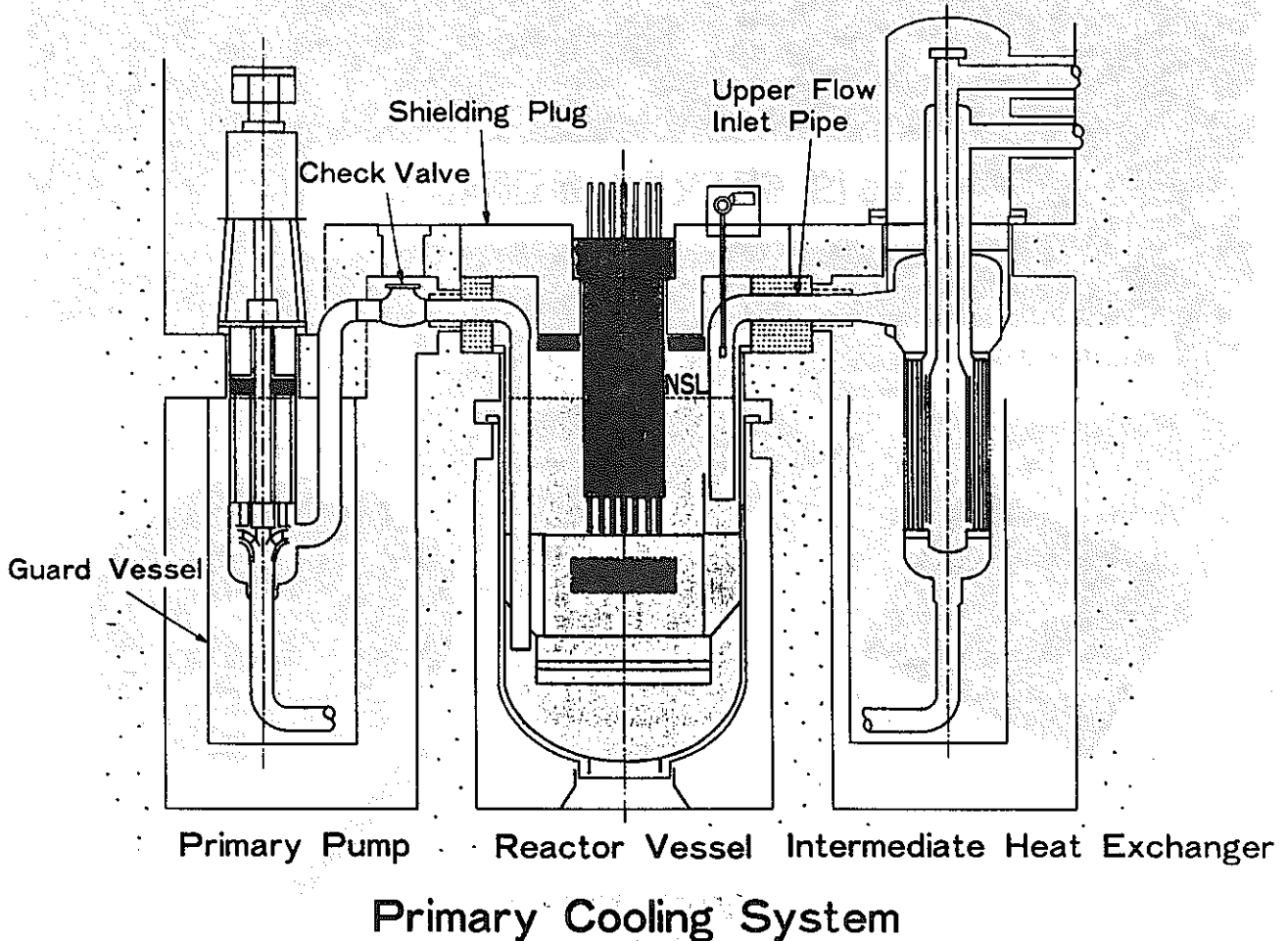
① 対象とする放射線場に応じた最適組成の選定

- ・ 複合放射線場用 : 2種類
- ・ 高速中性子場用 : 2種類
- ・ 熱中性子場用 : 1種類

② 耐熱性を有した遮蔽材成形プロセスの開発

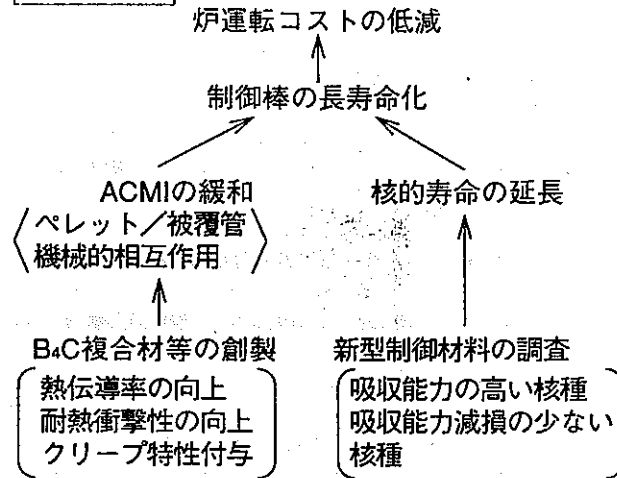
③ 高性能放射線遮蔽創製の見通し

特許申請 9件 (内、米国1件、仏国1件)



高性能核分裂制御材の創製

研究の目的



研究目標

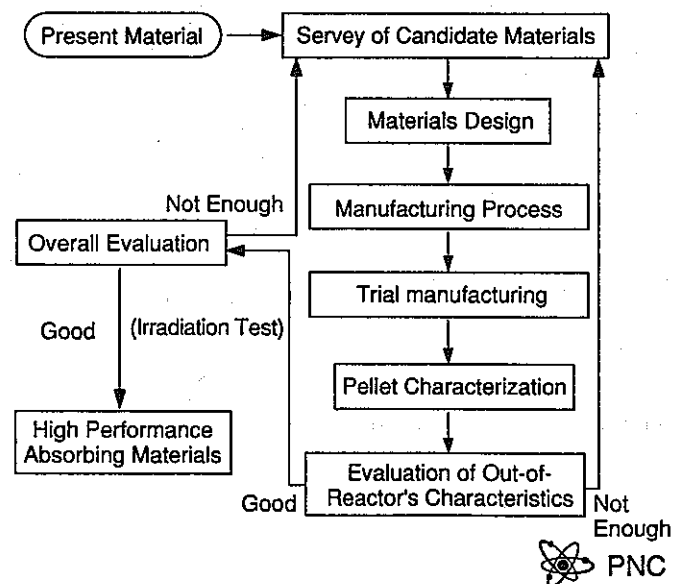
	現 状	目 標
燃 焼 度	80×10^{20} cap/cm ³	$>400 \times 10^{20}$ cap/cm ³
被覆管温度	約500℃	約650℃
寿 命	1 年	4 年以上

Research Subject

Creation of New Absorbing Materials

- (1) Selection of Candidate Chemical Compositions
- (2) Investigation of Pellet Manufacturing Process
- (3) Characterization of Pellet
- (4) Evaluation of Out-of-Reactor's Characteristics
- (5) Screening of Promising Materials

Research Flow



材料成分選定の根拠

B ₄ C/Ni	NiはB ₄ Cとの濡れ性が高い Niは加工性が良い
B ₄ C/Cu-Ni	CuはB ₄ Cと反応しない/熱伝導率が高い NiはB ₄ CとCuとの濡れ性を改善する
B ₄ C/Zr	Zrは加工性が良い Zrは中性子照射環境での使用実績が高い
B ₄ C/Mo	Moは融点が高い/熱伝導率が高い
B ₄ C/SiC ^{カカ}	ウイスカにより高靱性化する/割れにくくなる ブリッジング効果・プルアウト効果
EuB ₆	B含有量が高い Euは中性子吸収能力がある
SiB ₆	B含有量が高い
TiB ₂	熱伝導率が高い

Table Overall Evaluation of Out-of-Reactor 's Characteristics

Materials				Evaluation (Ranked)			
No.	Chemical Compositions	Mixing Ratio (vol%)	Smear Density *1 (%TD)	Thermal Conductivity	Thermal Shock Resistance	Hardness	Overall Evaluation
Ni40	B ₄ C/Ni	40 : 60	90	× 10	8	○ 4	×
Zr60	B ₄ C/Zr	60 : 40 40 : 60	90 90	◎ 4 ◎ 2	○ 5 6	○ 4 (Not Evaluated)	◎ 4 △
Mo80 Mo60	B ₄ C/Mo	80 : 20 60 : 40	90 90	× 9 ○ 5	(Not Evaluated) ◎ 2	8 ○ 4	(Not Evaluated) ◎ 2
Cu60LD Cu50LD Cu50HD	B ₄ C/Cu-Ni	60 : 40 50 : 50 50 : 50	80 80 90	× 10 7 ◎ 3	(Not Evaluated) (Not Evaluated) ◎ 1	◎ 1 ◎ 1 ◎ 3	(Not Evaluated) (Not Evaluated) ◎ 1
Eu	EuB ₆	—	90	○ 5	× 10	○ 7	×
Si	SiB ₆ *2	—	90	× 12	○ 4	9	○
Ti	TiB ₂	—	90	◎ 1	6	(Not Evaluated)	△
SiC	B ₄ C/SiC Wisker	80 : 20	90	(Not Evaluated)	◎ 3	(Not Evaluated)	◎ 3
—	B ₄ C(Ref.)	—	90	8	8	10	—

*1 Nominal Value

*2 Mixture of SiB₁₄ and Si



まとめ

B₄C 複合材等の創製

- ① 試作材製造プロセスの検討・改良をおこない、適正なペレット製造条件を見い出した。
- ② 炉外性能評価の結果より、以下の材料が B₄C よりも優れた特性を持つことが分かった。

B ₄ C / Cu-Ni	(50 : 50vol%)	密度90%TD
B ₄ C / Mo	(60 : 40vol%)	
B ₄ C / Zr	(60 : 40vol%)	
B ₄ C / SiC ウィスカー	(80 : 20vol%)	

結論

新成分系の材料設計、製造プロセス開発、試作材の諸特性評価および材料改良方策の検討により、いくつかの新素材を創製できる見通しを得た。

高性能遮蔽材、高性能制御材



終了

今後の予定

セラミックス、傾斜機能材



発展的継続

透明中性子遮蔽材、表面改質技術



新規テーマ

5. 最近のトピックス

(1) 消滅処理研究

第一期フロンティア研究成果報告会

4.最近のトピックス

核分裂生成物の放射能を消滅させる

(1) 消滅処理研究

東海事業所 先端技術開発室

原田 秀郎

原子力の研究開発及び利用に関する長期計画

平成6年6月24日
原子力委員会

第2章 我が国の原子力開発利用の在り方

7. バックエンド対策

(1) 放射性廃棄物の処理処分

3 サイクル廃棄物の処理処分

なお、高レベル放射性廃棄物の資源化と処分に伴う環境への負荷の低減の観点から将来の技術として注目されている核種分離・消滅処理技術に関わる研究開発については、当面、日本原子力研究所、動力炉・核燃料開発事業団が協力して基礎的な研究開発を計画的に推進することとし、1990年代後半を目途に各技術を評価し、それ以降の進め方について検討していくこととします。

8. 原子力科学技術の多様な展開と基礎的な研究の強化

(2) 原子力エネルギーの生産と原子力利用分野の

拡大に関する研究開発

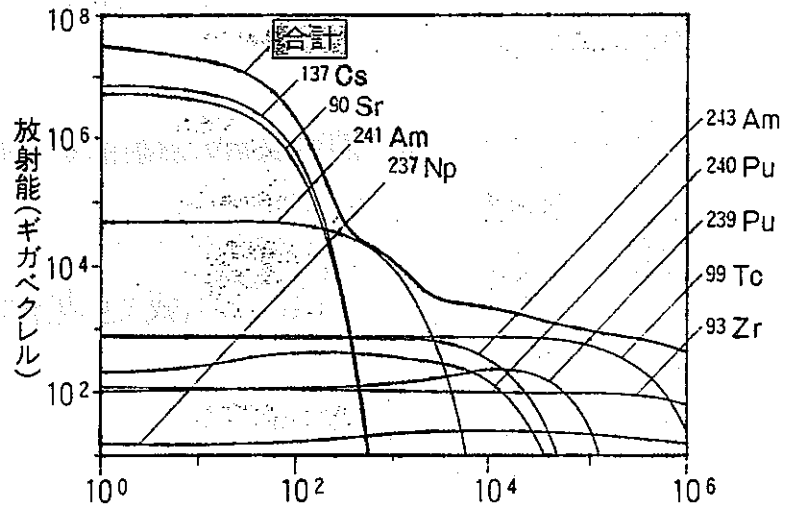
1 新しい概念の原子力システムに関する研究開発

核種分離・消滅処理については、湿式・乾式の核種分離に関する研究や原子炉、大強度陽子加速器等を用いて長寿命核種を短寿命化・非放射化する消滅処理法の研究を進めます。また、このために必要となるTRUの核データ等の整備、充実を図ります。

消滅処理対象核種

核分裂生成物	半減期
^{90}Sr	28.5年
^{137}Cs	30.0年
^{99}Tc	21.3万年
^{93}Zr	150万年
アクチノイド元素	半減期
^{241}Am	433年
^{243}Am	7380年
^{240}Pu	6560年
^{239}Pu	24100年
^{237}Np	214万年

核分裂生成物とアクチノイド元素の代表例



ガラス固化後の時間(年)
ガラス固化体1本あたりの放射能の時間変化の計算例

高レベル放射性廃棄物の放射能の時間変化

処理速度

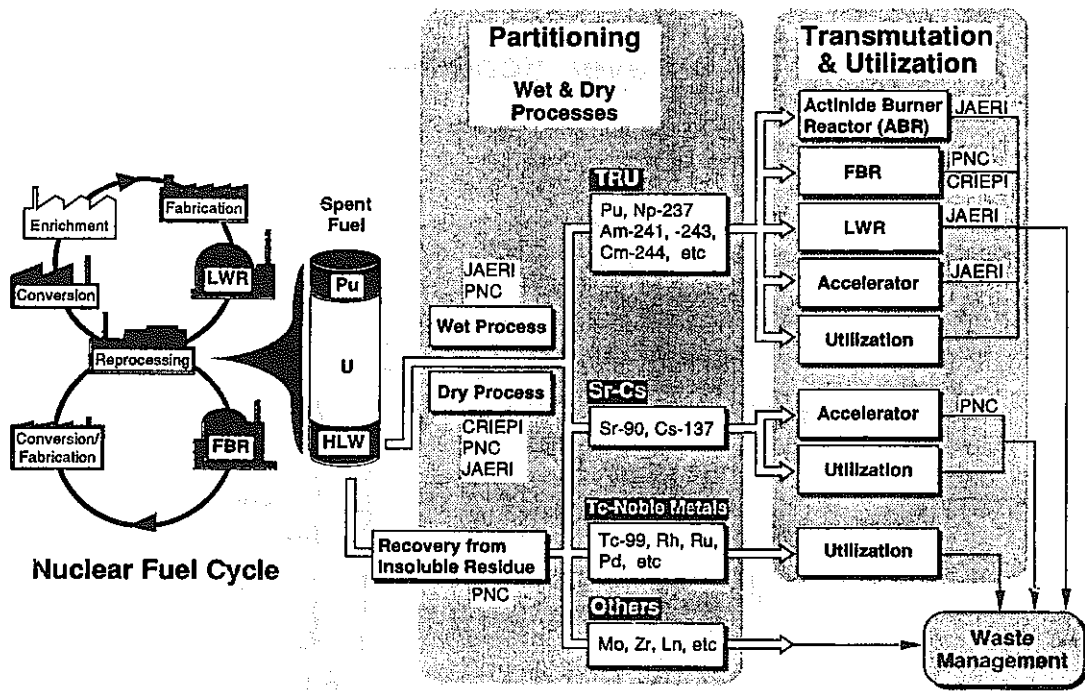


$$R = \sigma \cdot \phi$$

核反応断面積

ビームフラックス



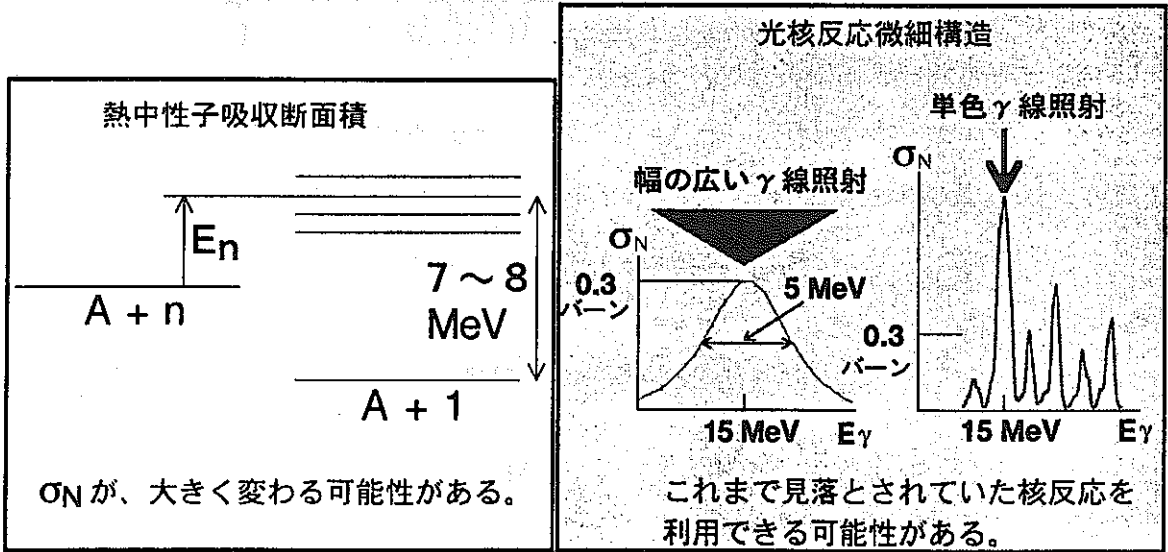
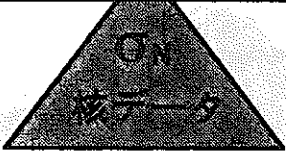


P-T R&D ACTIVITIES UNDER OMEGA PROGRAM

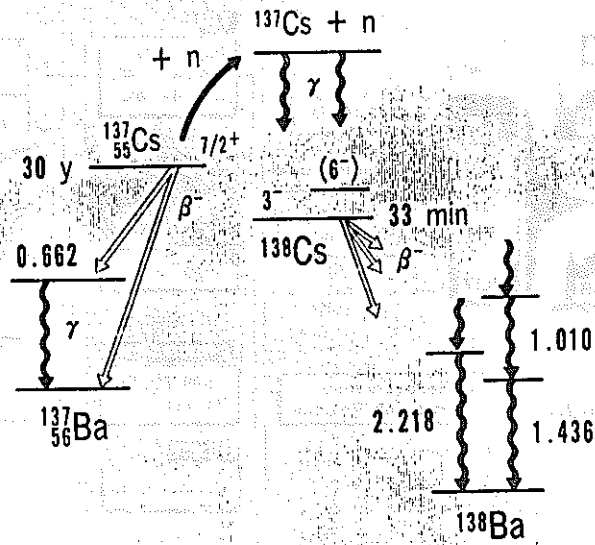
消滅処理方法の評価

① 消滅エネルギー σ_N / σ (競争過程)

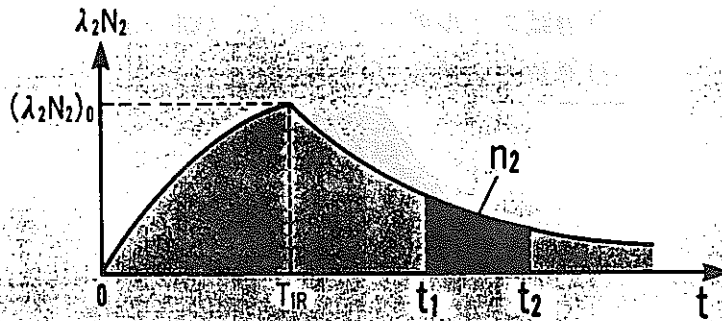
② 消滅処理速度 $R = \sigma_N \cdot \phi$



Level Scheme



Activity $\Rightarrow \sigma$



$$(\lambda_2 N_2)_0 = N_1 \sigma \phi (1 - e^{-\lambda_2 T_{IR}})$$

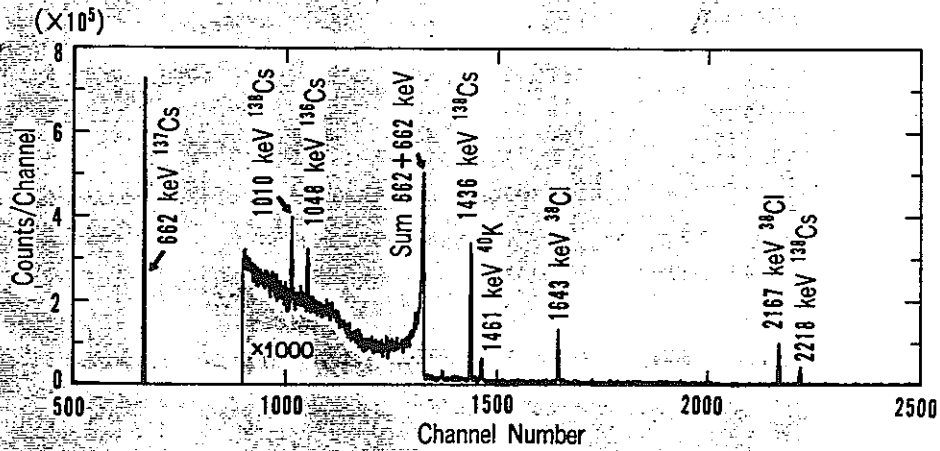
$$\therefore \sigma = \frac{(\lambda_2 N_2)_0}{\lambda_1 N_1} \cdot \frac{\lambda_1}{\phi (1 - e^{-\lambda_2 T_{IR}})}$$

$$A(^{138}\text{Cs}) \rightarrow (\lambda_2 N_2)_0$$

$$A(^{137}\text{Cs}) \rightarrow \lambda_1 N_1$$

$$A(^{60}\text{Co}) \rightarrow \phi$$

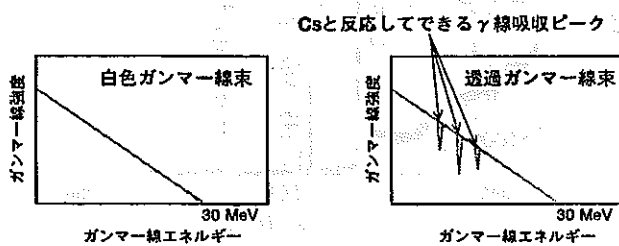
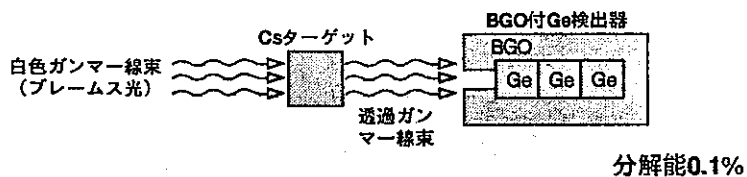
核反応断面積測定実験



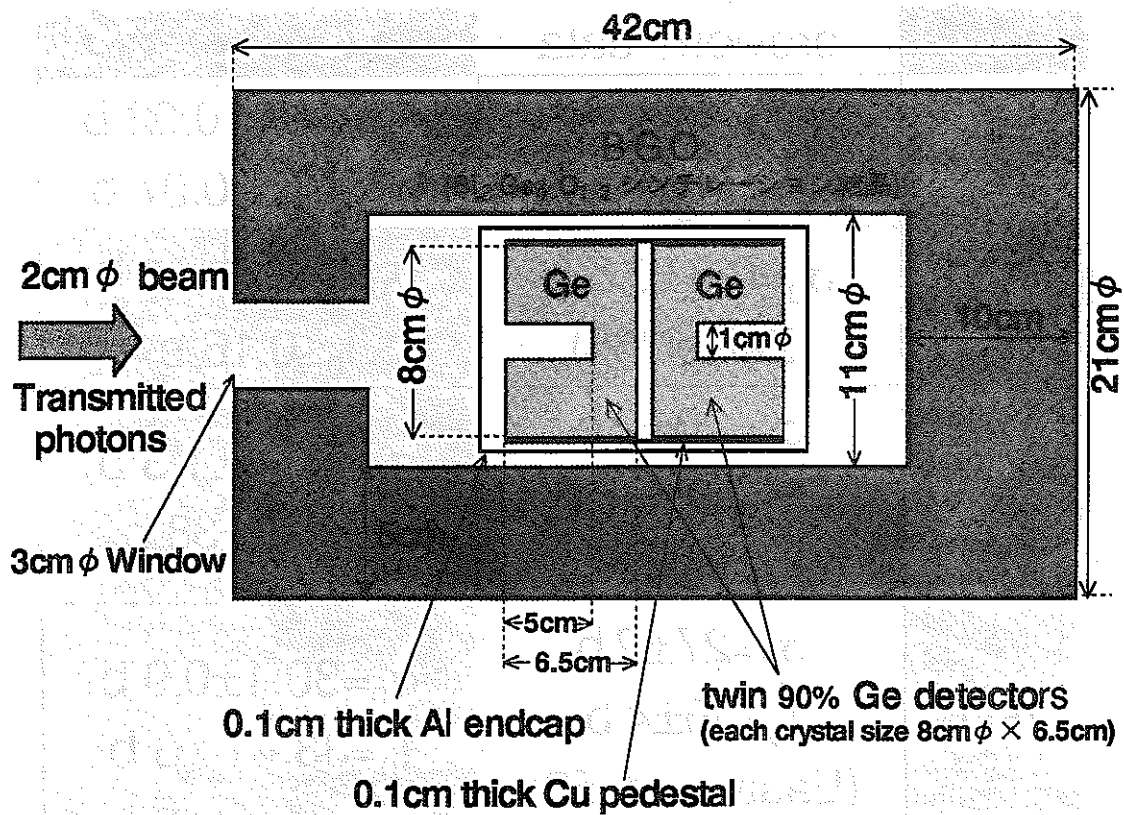
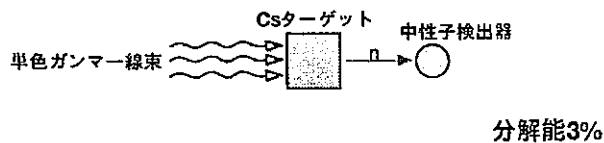
Gamma-ray spectrum obtained from neutron-irradiated and chemically purified ^{137}Cs sample in 10-min measurement

nuclide	previous data	our measurements
^{137}Cs	$\sigma_0 = 0.11 \pm 0.03 \text{ b}$ (Stupegia '60)	$\sigma_0 = 0.25 \pm 0.02 \text{ b}$ $I_0 = 0.36 \pm 0.07 \text{ b}$
^{90}Sr	$\sigma_0 = 0.8 \pm 0.5 \text{ b}$ (Zeisel '66)	$\sigma_0 = 15.3 \pm 1.3 \text{ mb}$ $I_0 \leq 0.16 \text{ b}$
^{99}Tc	$\sigma_0 = 20 \pm 2 \text{ b}$ $I_0' = 186 \pm 16 \text{ b}$ (Lucas '77)	$\sigma_0 = 22.9 \pm 1.3 \text{ b}$ $I_0 = 398 \pm 38 \text{ b}$
^{129}I	$\sigma_0 = 27 \pm 2 \text{ b}$ $I_0 = 36 \pm 4 \text{ b}$ (Eastwood '58)	$\sigma_0 = 30.1 \pm 0.9 \text{ b}$ $I_0 = 33.4 \pm 1.3 \text{ b}$

新提案法：



在来法：



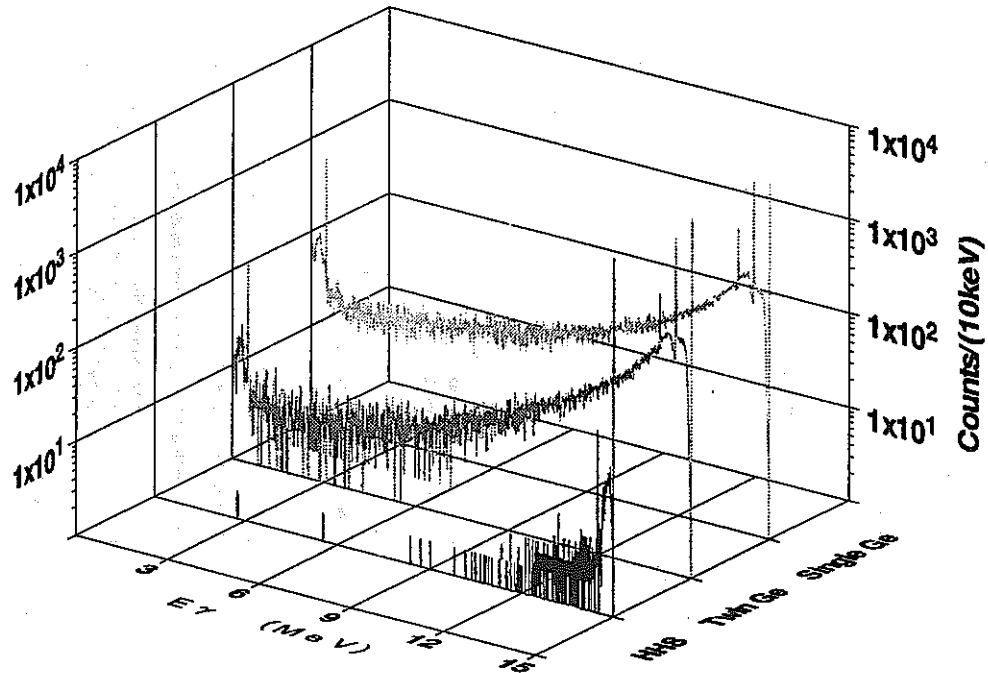
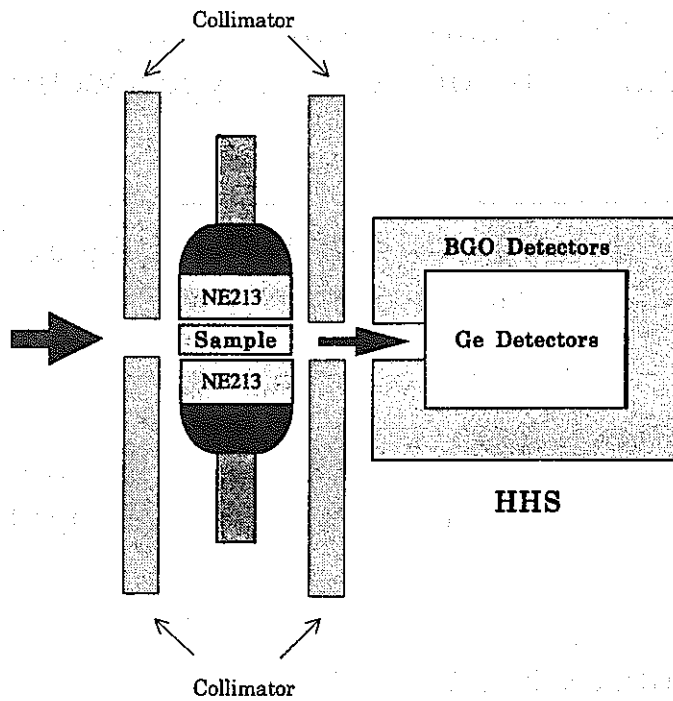
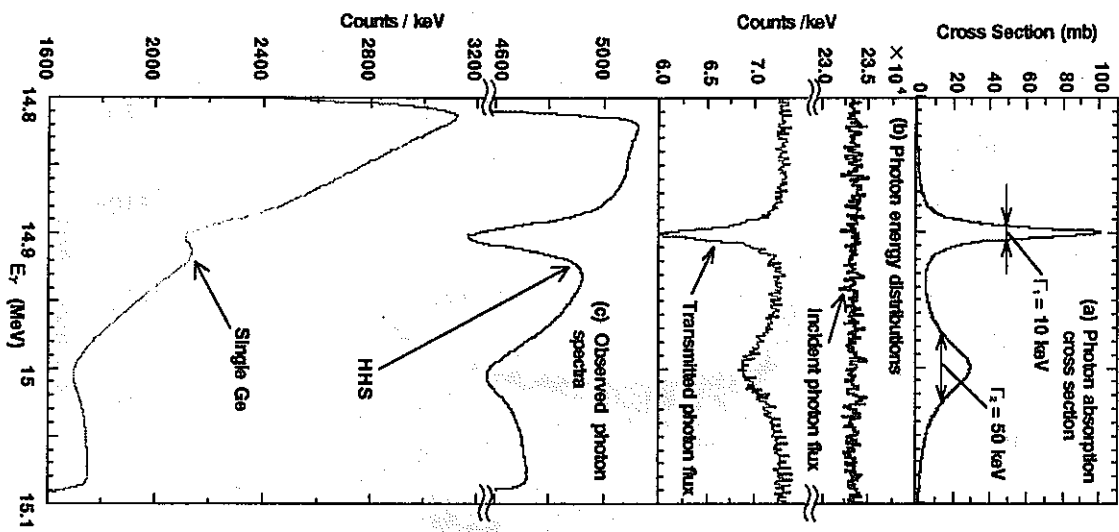


Table I Simulation results on the peak efficiency and peak/background ratio of the three type spectrometers for 15 MeV photons

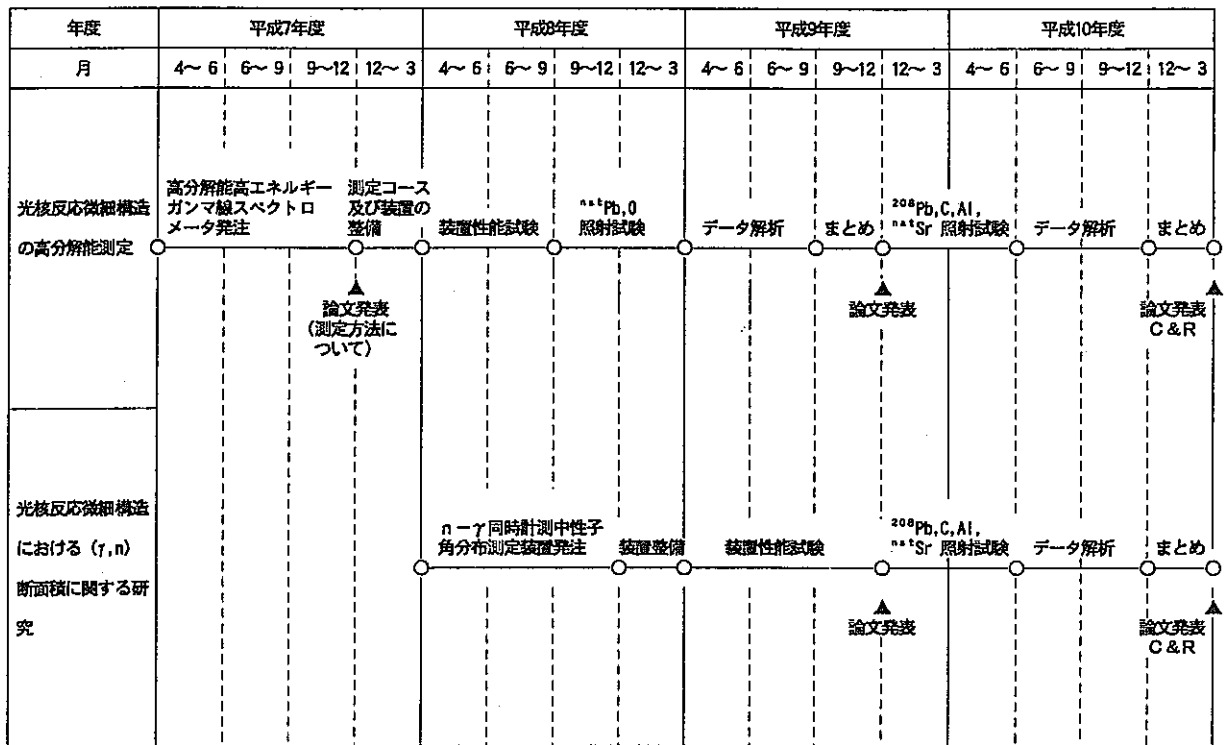
Detector type	Peak Efficiency ^a (%)	$Y_{\text{peak}}/Y_{\text{background}}^{\text{b}}$
single Ge	2.5	0.044
twin Ge	6.5	0.091
HHS	6.5	3.8

a: The photopeak efficiency was defined as the ratio of photopeak counts to the number of incident photons (see Fig. 2)

b: The $Y_{\text{background}}$ was defined as total counts (Y_{total}) minus photopeak counts (Y_{peak}), ie., $Y_{\text{total}} - Y_{\text{peak}}$



光核反応微細構造に関する研究タイムスケジュール



(2) 大電力電子線形加速器の開発

平成7年11月20日

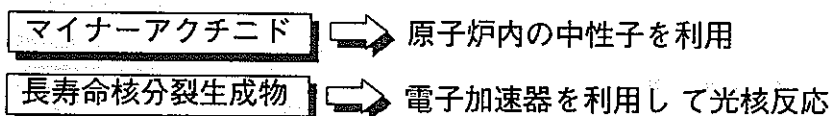
フロンティア研究成果報告会

核分裂生成物の放射能を消滅させる (b) 大電力電子線形加速器の開発

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター
基盤技術開発部
先進技術開発室
江本 隆

はじめに

高レベル放射性廃棄物



MA核種は熱中性子断面積や共鳴吸収断面積が非常に大きいため、中性子を一度吸収させて核分裂断面積の大きい核種に変換して消滅させることができる。高速炉においては、中性子スペクトルが硬いため、大量のMAを装荷でき、高次のアクチニド(Cm等)の生成量が少ないため、熱中性子炉による消滅に比べて有利である。

一方、多くの長寿命核分裂生成物は中性子断面積が小さく、原子炉で消滅することは困難である。そのため、電子加速器を利用して光核反応により消滅する可能性を検討している。

電子線形加速器による消滅処理の特徴は

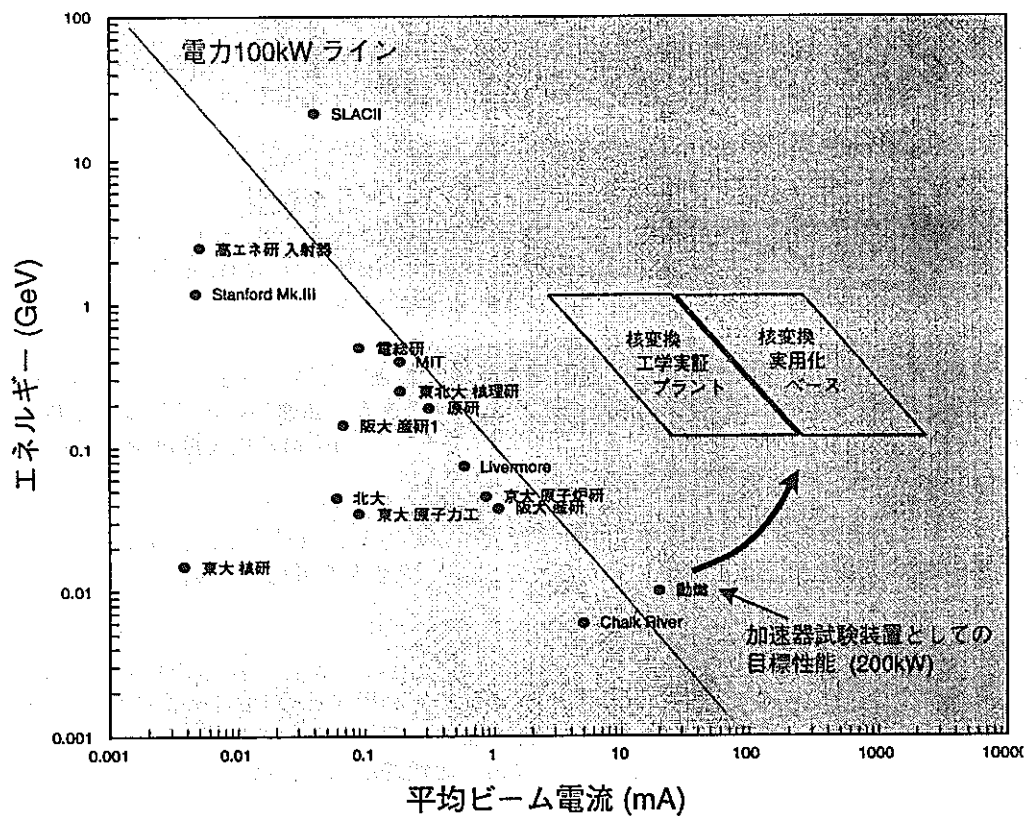
- ・光核反応を利用するので2次廃棄物が少ない
- ・加速器技術開発が他の加速器に比べて進んでいる。
- ・構造が比較的単純で安価である。

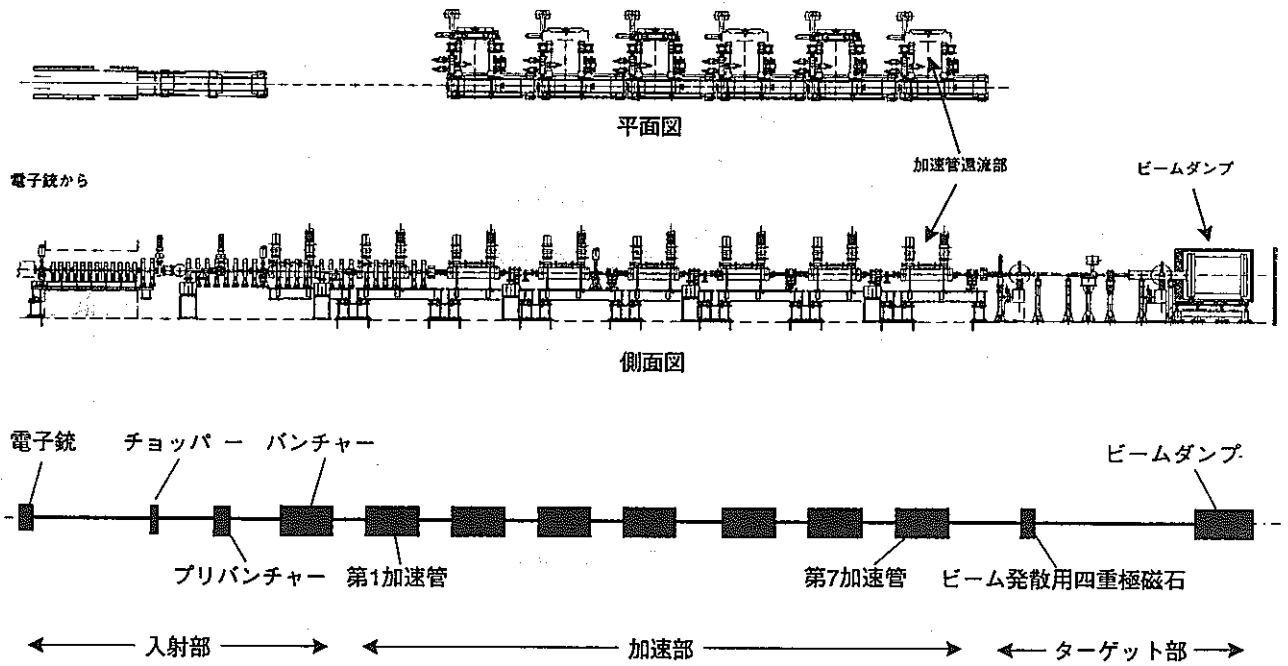
動燃では以上の理由により、将来の消滅処理システムに必要な加速器の大電力化・高効率化技術を開発することを目的として大電力CW電子線形加速器の要素開発に着手した。

加速器仕様

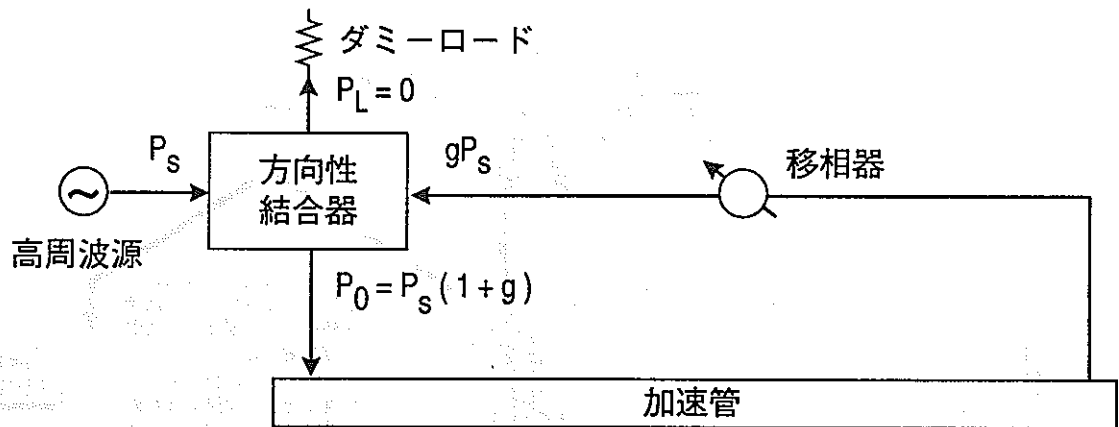
エネルギー	10 MeV
最大ビーム電流	100 mA
平均ビーム電流	20 mA
規格化エミッタンス	$50 \pi \text{ mm mrad}$
エネルギー分散	0.5 %
パルス幅	0.1 ~ 4 ms
繰り返し	0 ~ 50 Hz
Duty Factor	0 ~ 20 %
加速モード	$2/3 \pi \text{ mode}$

世界の代表的電子線形加速器の性能比較





加速器本体と基本構成



定常時の電力増幅率

$$\frac{P_0}{P_s} = 1 + g = \frac{1}{1 - (1/x^2)}$$

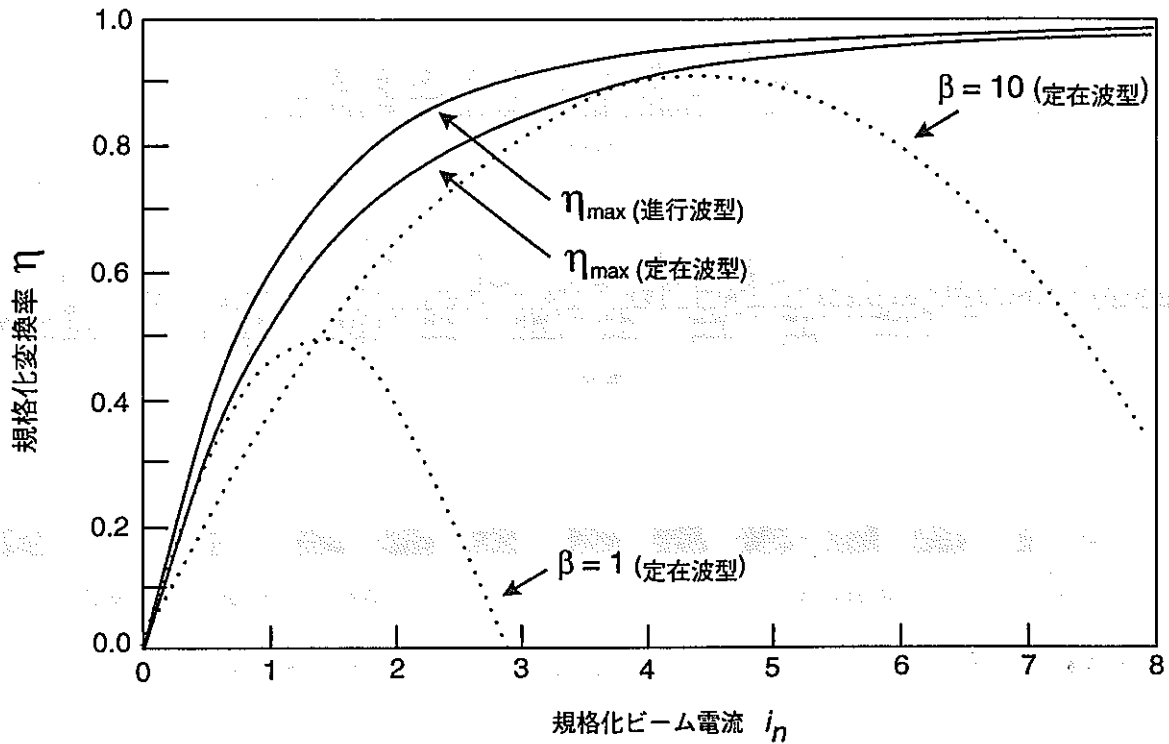
条件

$$\frac{P_s(1+g)}{x^2} = gP_s$$

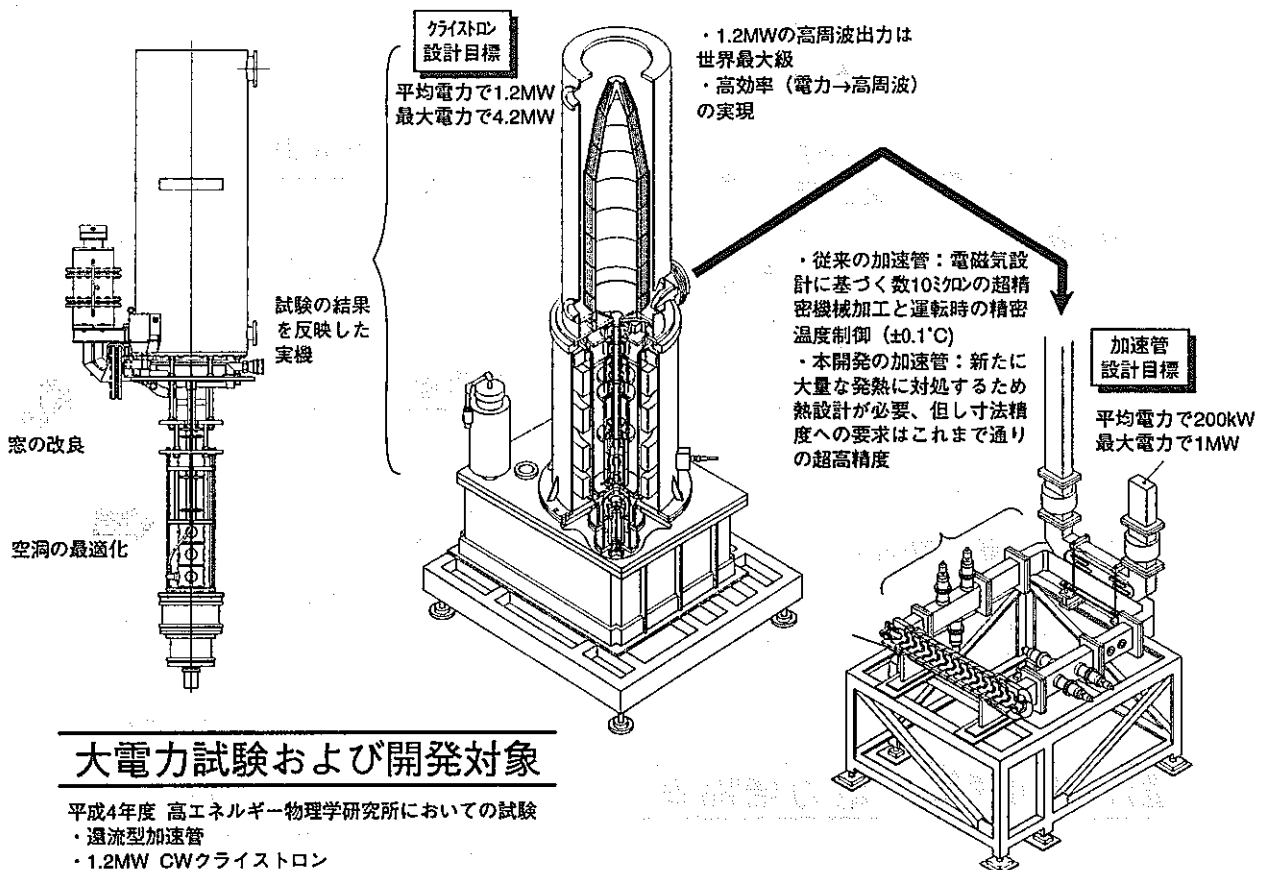
g 方向性結合器分岐比

x ビーム負荷、加速管壁による損失

還流型加速管の電力増幅率

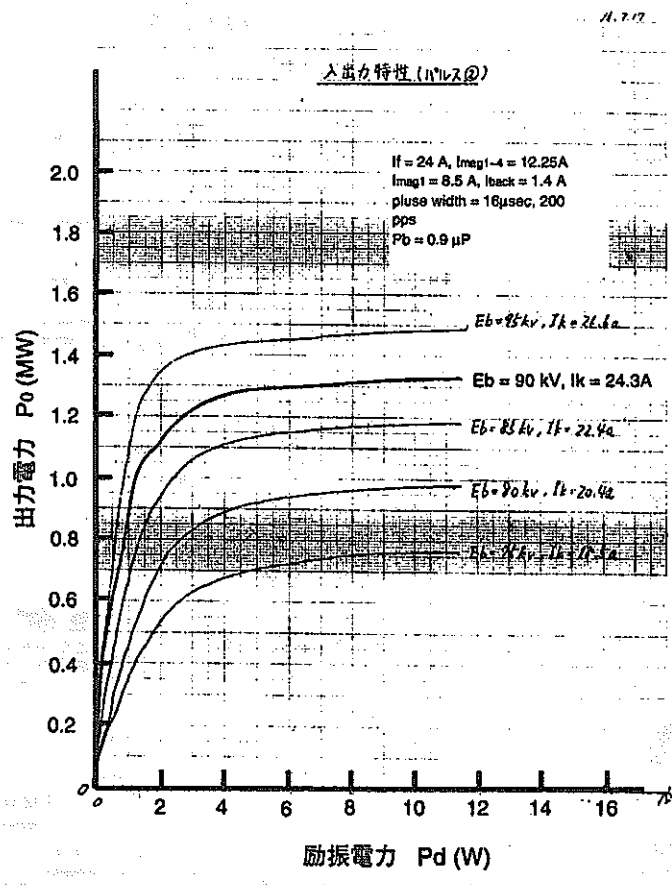
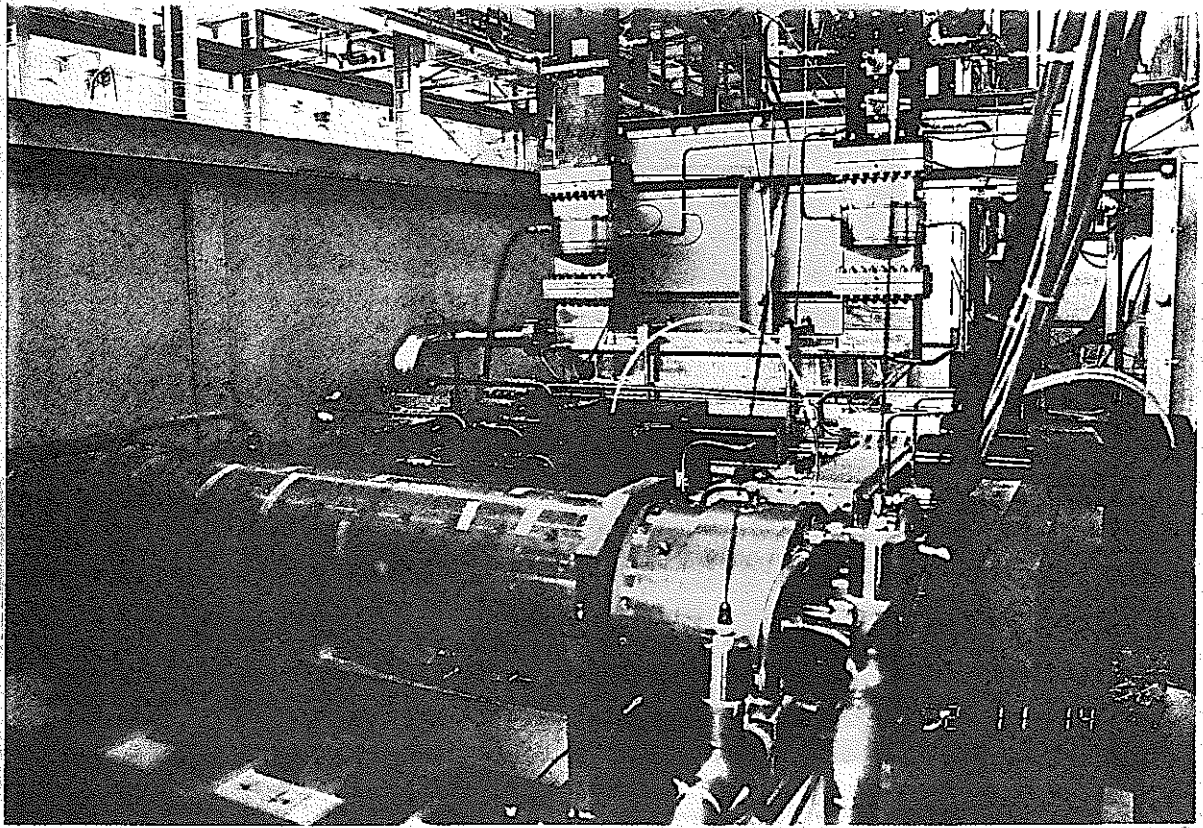


ビーム電流に対するRF電力からビーム電力への変換率
(超伝導加速管など理想的な場合)

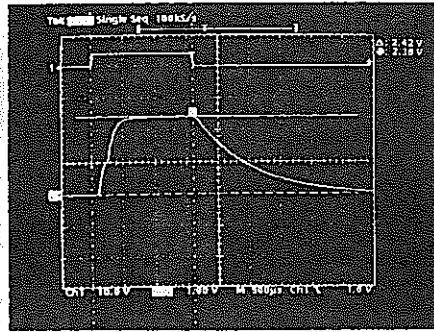


大電力試験および開発対象

平成4年度 高エネルギー物理学研究所における試験
 ・遷流型加速管
 ・1.2MW CWクリストロン

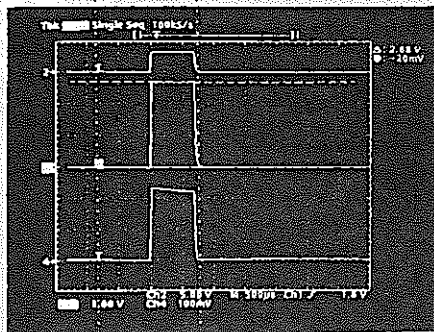


No.1クライストロンの入出力特性



電源入力パルス

ビーム電流
90kV、24.2A



RF入力パルス

RF出力パルス
1200kW

反射パルス
0.16kW
VSWR = 1.02

1.5 msec

RFパルス幅 0.68 μ sec 繰り返し 0.1 Hz

クライストロン RF 出力波形

計算機シミュレーション

チョバースリットの設計
ビームダンプの設計

電子カスケードモンテカルロ計算コード

EGS4

加速器入射部概略図

電子銃

チョバースリット

チョバースリット

プリバンチャー

バンチャー

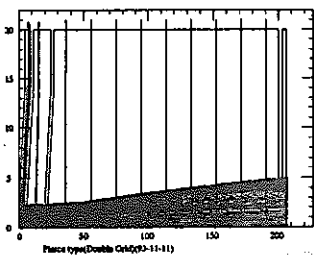
第一加速管

電子銃の設計

加速管・入射器の設計

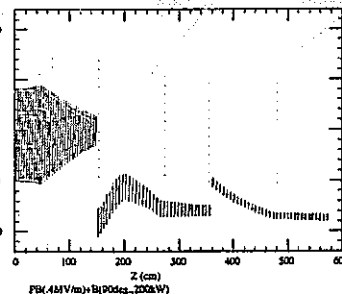
Z-P profile

加速管・入射器・チョバースリットの設計



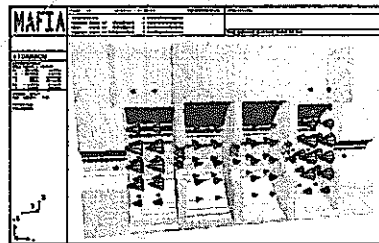
電子銃軌道解析コード

EGUN



電子軌道解析コード

PARMELA



3次元電磁場解析コード

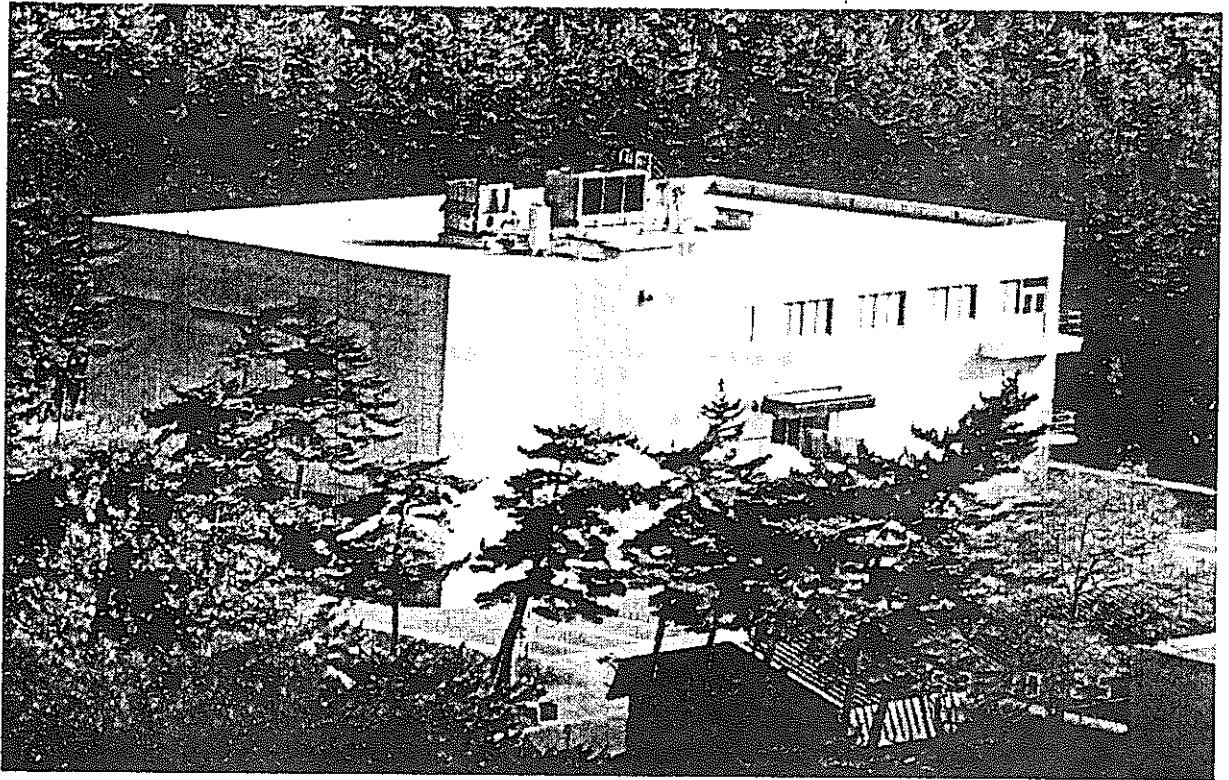
MAFIA

HFSS

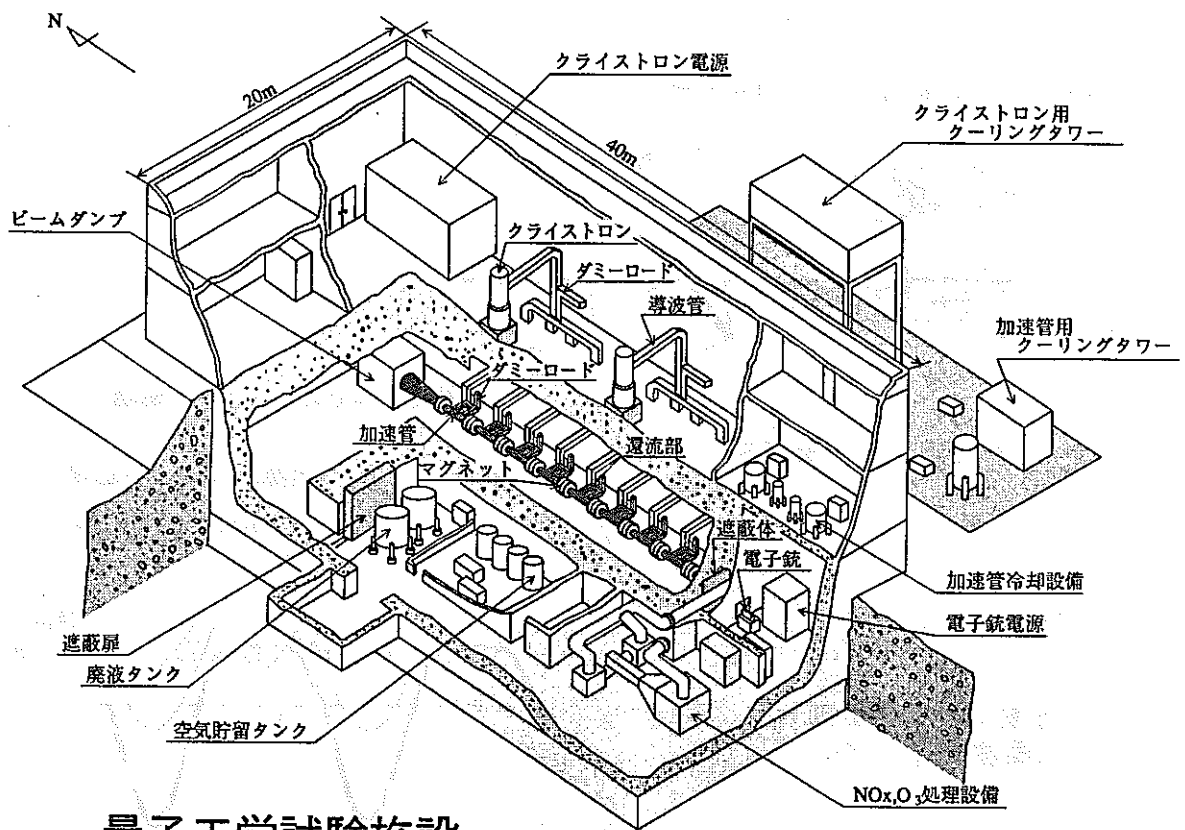
2次元電磁場解析コード

POISSON

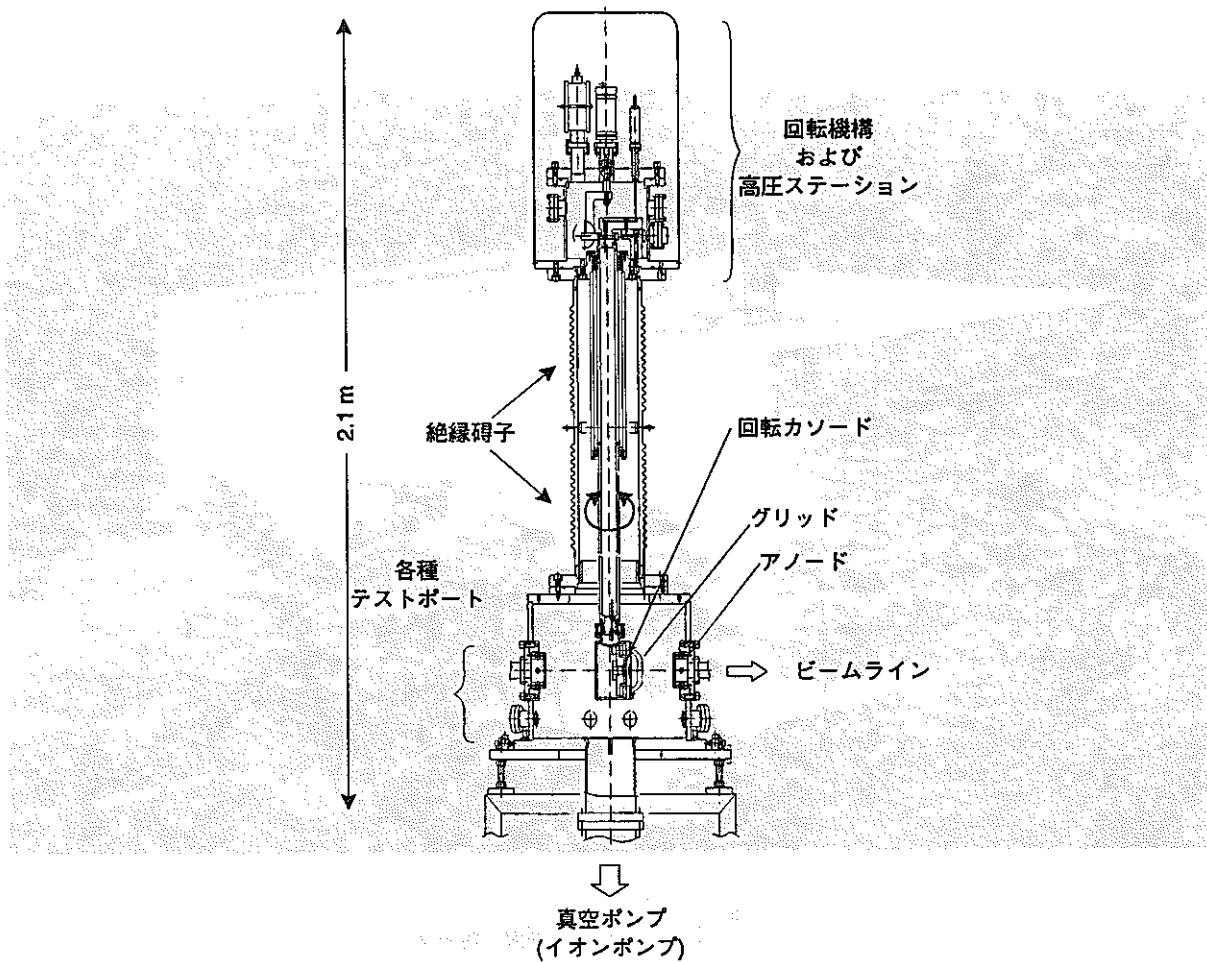
SUPERFISH



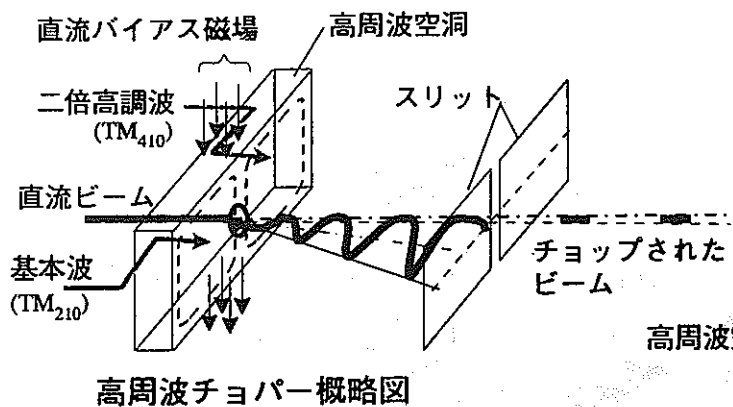
量子工学試験施設



量子工学試験施設



電子銃側面図

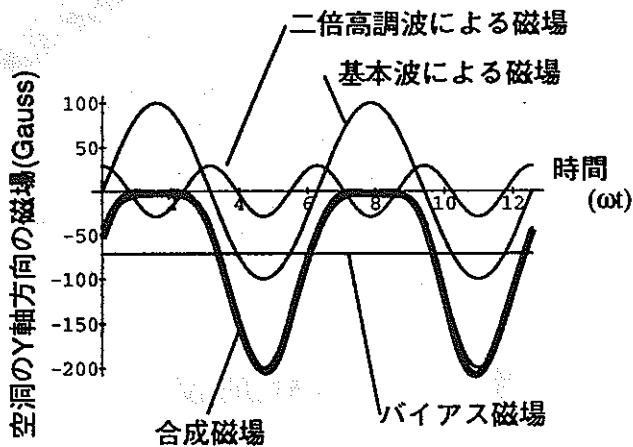


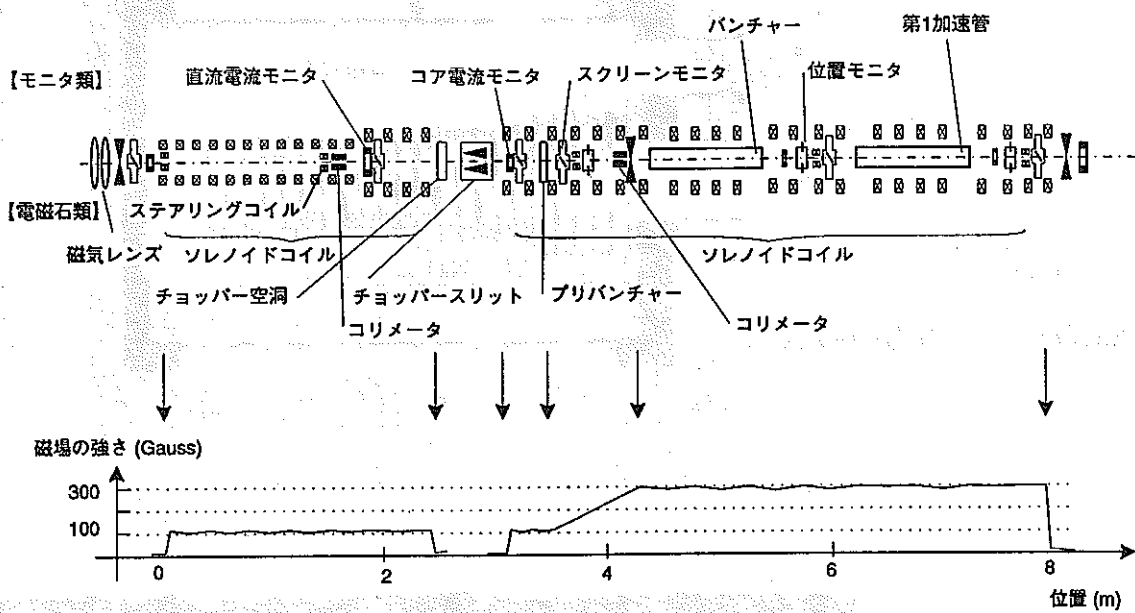
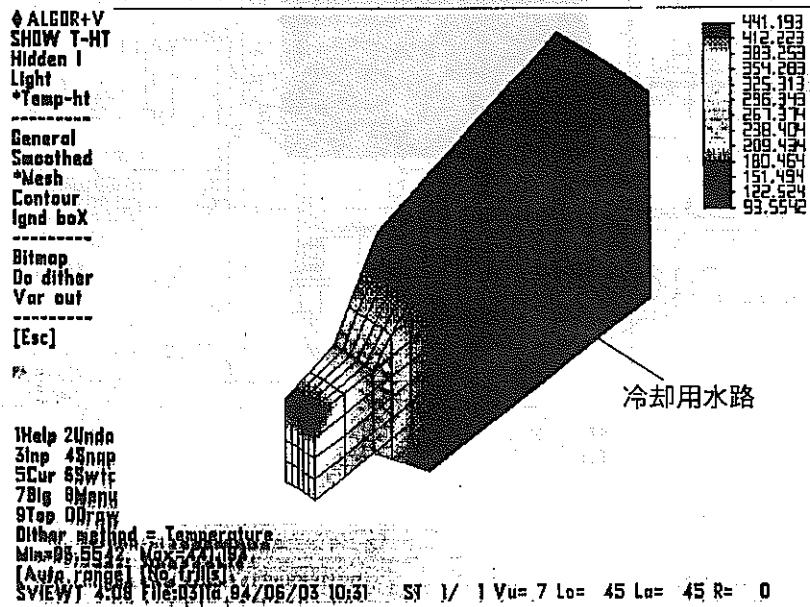
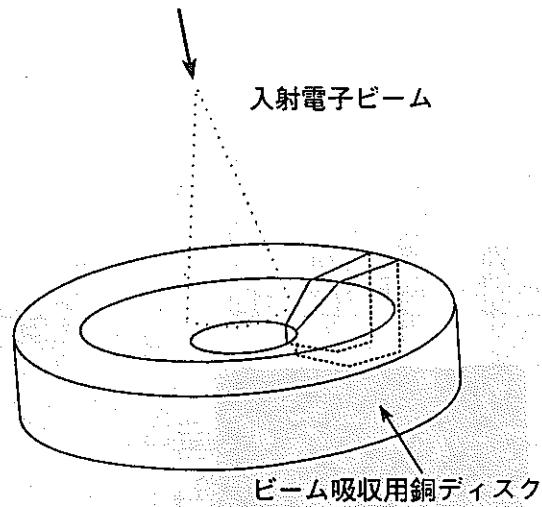
高周波チョッパー概略図

高周波空洞でのY軸方向の磁場

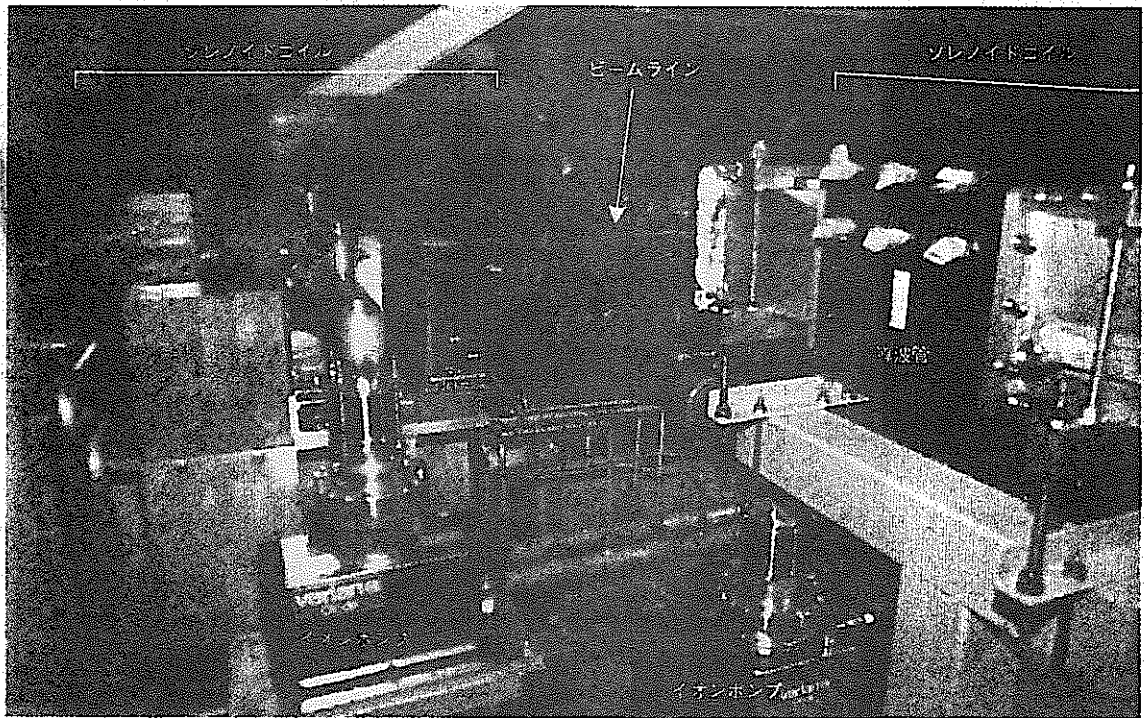
高周波チョッパー

- ・新考案による高品質、高効率の高周波チョッパー

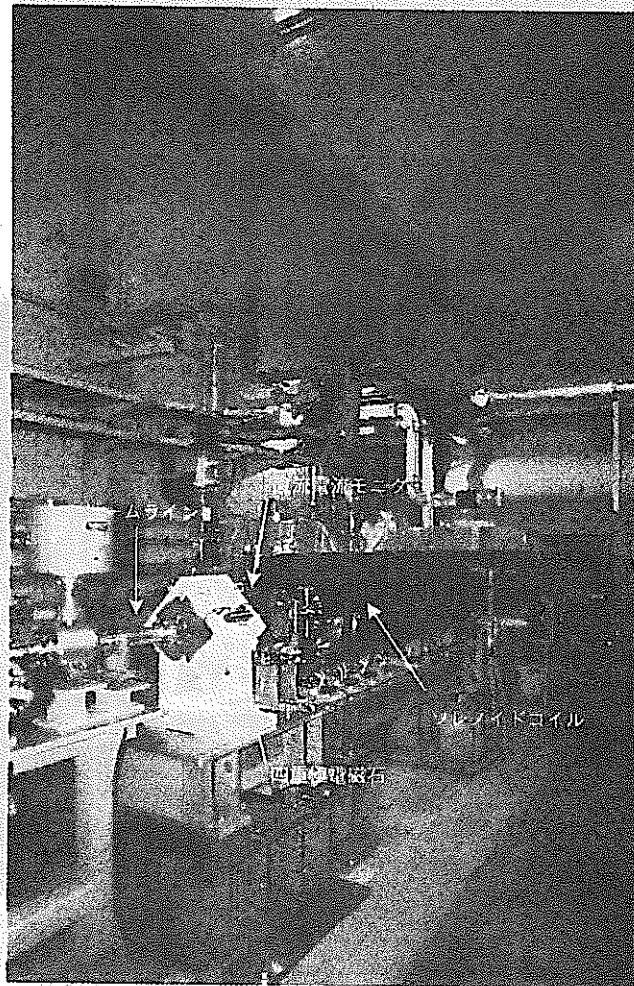




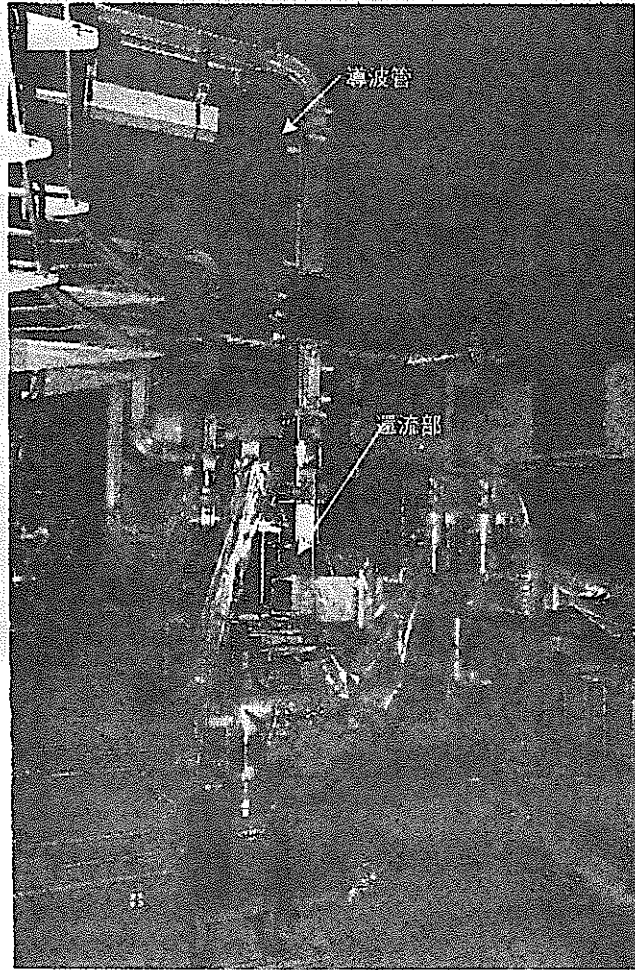
入射部の機器配置



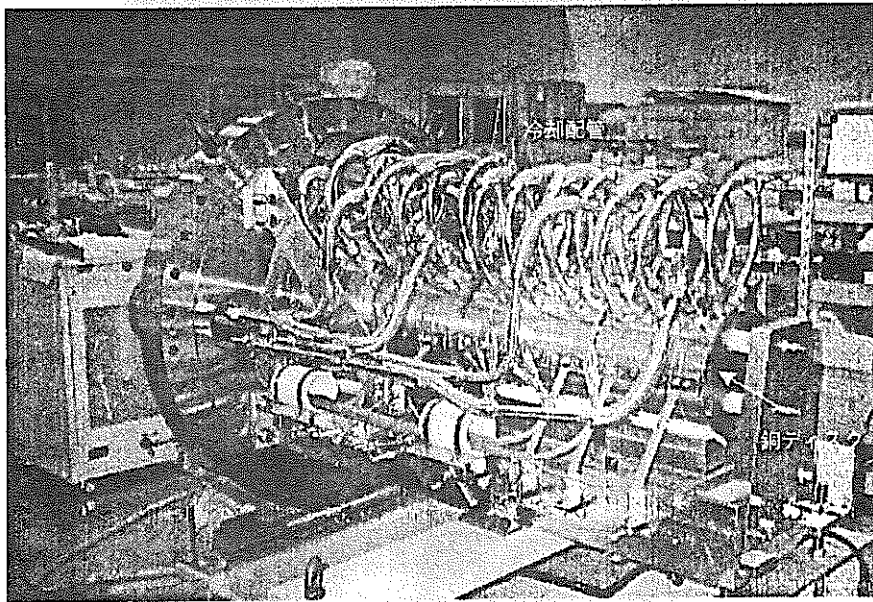
入射部チョッパー付近



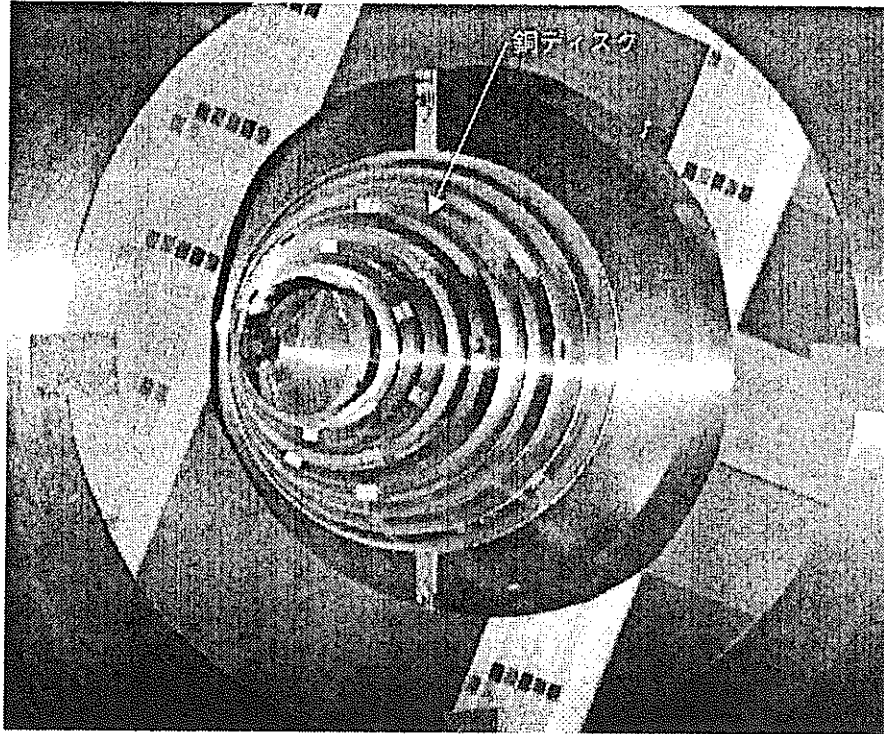
入射部(下流から)



還流部

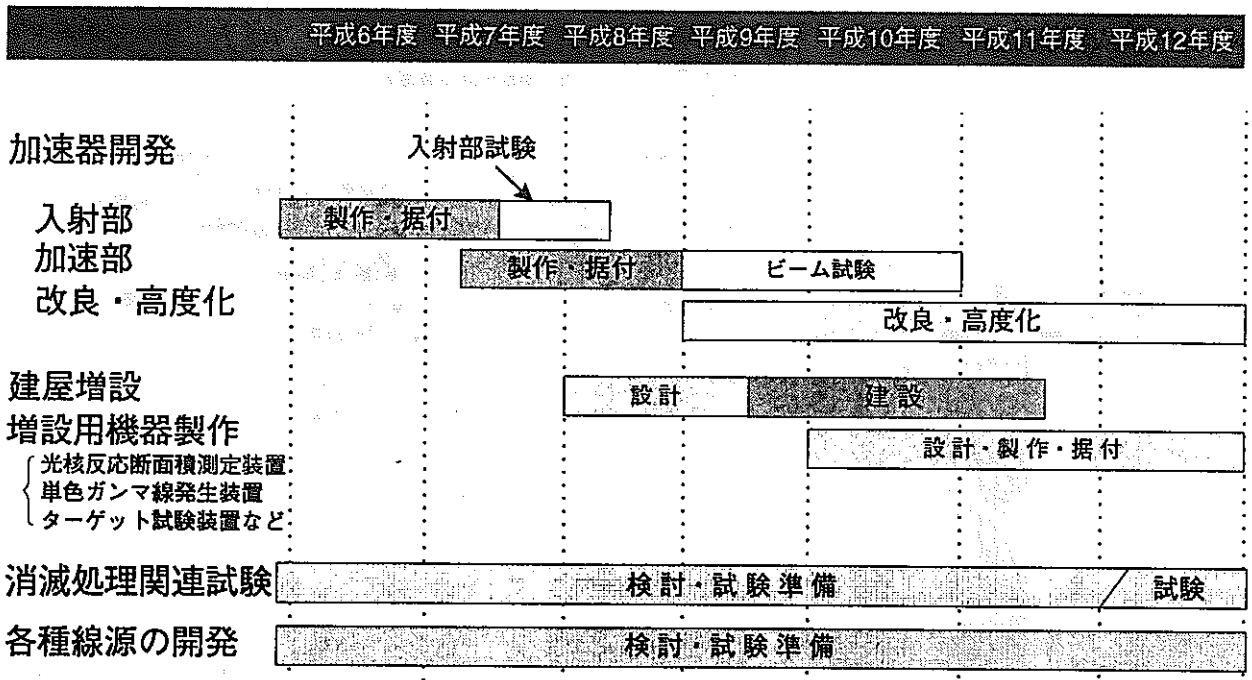


ビームダンプ本体



ビームダンプディスク

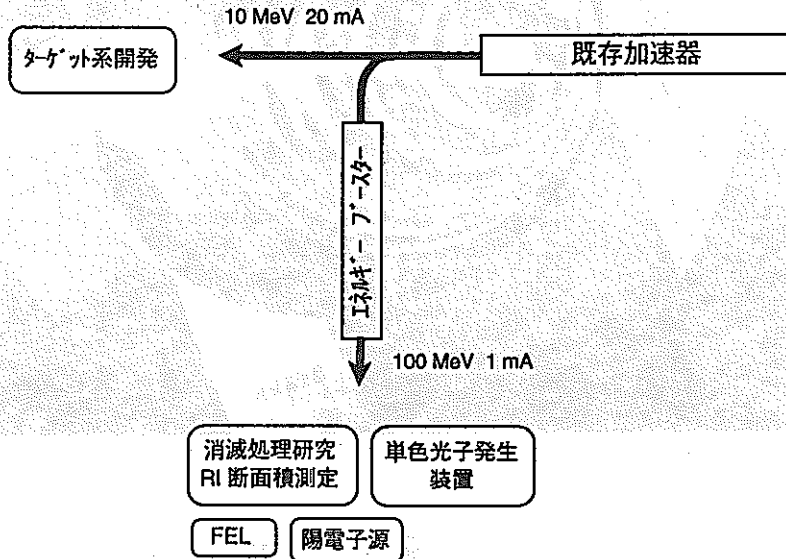
今後の計画



ビーム利用計画

本加速器はエネルギー10MeV、平均電流20mAであり、現状では、加速器技術の開発、工業応用(材質改質、重合促進など)などに利用できる。

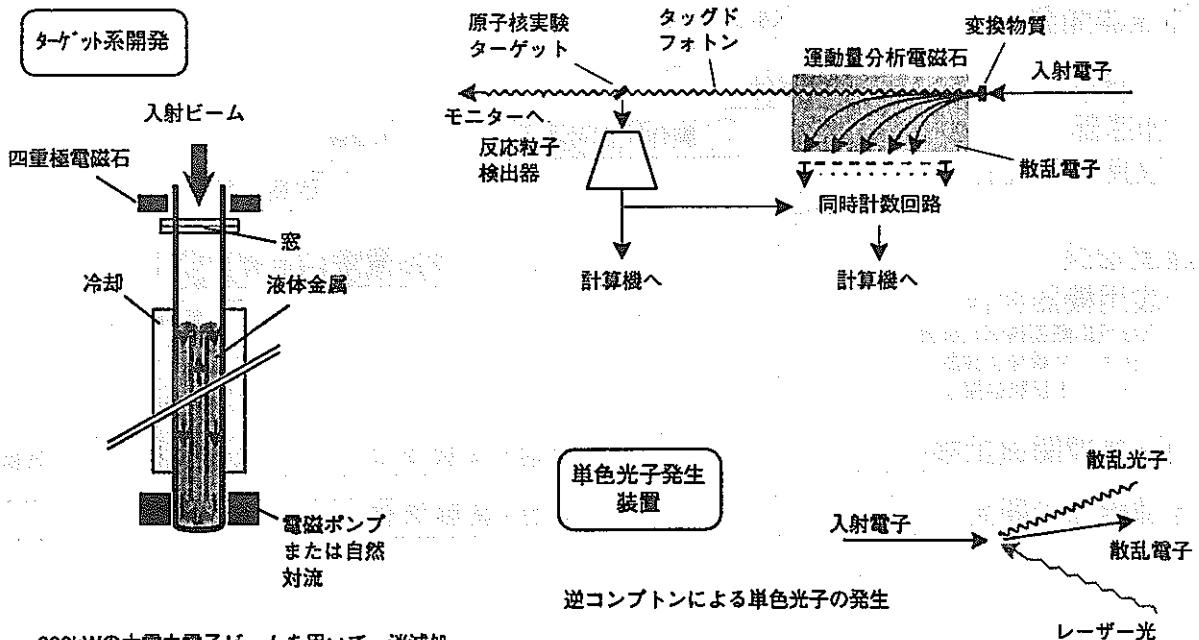
高デューティという特徴を生かして加速器要素開発以外の利用を検討している。



ビーム利用計画

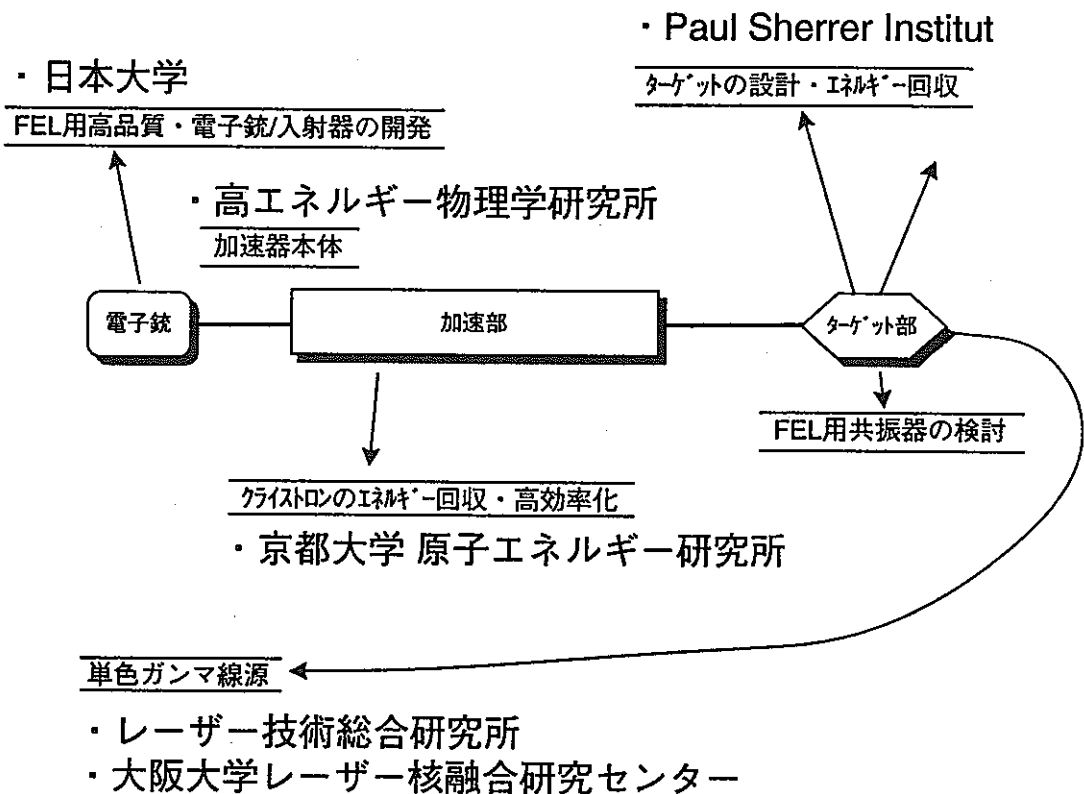
消滅処理研究
RI 断面積測定

高デューティのビームを生かしてタギング法による単色光子を用いて、反応断面積を測定する。特にCs、SrなどRIが測定出来る装置とする。



200kWの大電力電子ビームを用いて、消滅処理用ターゲットの開発を行う。Csなどの液体金属をターゲットに用いた熱工学試験を行う。

共同・委託研究



まとめ

- ・他に例の無い大電流加速器をいくつかの新しい考案を含めて設計した。
- ・高エネルギー物理学研究所における大電力試験およびシミュレーションの結果を実機的设计・製作に反映できた。
- ・ビーム電流を徐々に上げて目標性能であるエネルギー10MeV、電流20mAを目指す試験および制御を行う予定である。
- ・本加速器は増設試験施設において、消滅処理研究としてRI断面積測定、単色光子発生、ターゲット系開発など基礎研究に利用される予定である。

6. 質 疑 応 答

第I期フロンティア研究成果報告会に於ける質疑応答について

(1) レーザー同位体分離技術

Q) 分子法では、高濃縮ウランができると思うが核不拡散上の問題はないか、すでに濃縮技術として遠心分離法の技術を保有しているのに、どのような理由で開発を行っているのか？

A) 原子力長計に基づき、次世代の経済性のある濃縮技術開発として実施している。

A) 技術的には、分子ビームへの照射のような、衝突のない極低温の理想的な条件でも10%までしか濃縮できないので、高濃縮ウランの製造は困難である。高濃縮が可能な原子法とは異なり、核不拡散性に優れた技術である。

Q) 一回の照射で高濃縮ウランができなくても、なんとか濃縮操作を繰り返せば、高濃縮ウランができると思うが？

A) ご指摘のとおりである。このことは、分子法に限ったことではなく、ガス拡散法でも、遠心分離法でも同じである。但し、分子法は製品が固体のUF₆なので、再フッ化が必要となり、技術的には難しいだろう。

Q) 同位体交換反応は非常に遅いと思うが、どうだろうか？

A) ご指摘のとおりである。試験で確認したところ、分離性能への影響は非常に小さいことを確認している。

(2) 光溶液化学の研究

特になし

(3) 自律型運転制御システムの開発

Q) 運転戦略において上位レベルのある機能に障害が生じたときに出力維持が可能であるか？

A) 自律型運転制御システムの開発の対象プラントは、もんじゅを想定して開発している。もんじゅ体系のプラント階層化モデルをソフトウェア上で構築し、これに基づいて運転戦略を策定している。もしもプラントレベルの機能喪失が発

生した場合、出力維持は難しいと考える。

しかし、予めプラントに自由度のある自律型プラントを想定し、分散協調システムのプラント構築を行えば、機能階層化モデルのどこが故障したとしても、出力維持機能に影響することなくシステムが故障部分を切離し適切な戦略を構築することが可能であると考えている。

(4) 新概念高速炉の研究

Q) 深海炉は、無人自動運転か？

A) 人工衛星か又は海底敷設の光ケーブルにより陸上基地から遠隔操作で運転する。

(5) フラーレンに関する研究

Q) 金属内包フルラーレンの応用については、どの様なものが考えられるのか？

A) $Gd@C_{60}$ は現在MRI（核磁気共鳴断層撮影）用の薬剤として特許が取得され検討が進められている。

C_{60} の内に金属が入った $M@C_{60}$ が抽出できれば超電導体と成りうるので新たな応用が考えられる。

Q) ウラン入りナノ粒子については、核燃料としての応用が考えられないのか？

A) 1960～1970年代にかけて東北大学、原研にてFPの飛程より径の小さい黒鉛被覆の微粒子燃料の研究がなされたことがある。

学術的な興味としても、ぜひウラン内包ナノ粒子の照射試験を実施したい。

Q) ランタニド入りナノ粒子での元素の選択性について蒸気圧をパラメータにしているが、電子構造についてもパラメータとして考えることができるのではないか？

A) 御指摘の通りです。その他炭化物生成自由エネルギー、イオン化ポテンシャル、電気陰性度についても検討すべきだと思っております。

今回は、一つの簡単なパラメータとして紹介したものです。

- Q) $\text{La}@\text{C}_{82}$ のESRの超微細構造は、 La があれば必ず現れるのではないか？
- A) $\text{La}^{3+}@\text{C}_{82}^{3-}$ でないと、あのような等価な8本のスペクトルは現れない。
すなわち La 上には電子がないこと、 C_{82} 上に1つしか電子がないとこのような等価な8本のスペクトルは、現れません。

(6) 原子力用新材料の創製

- Q) セラミックスの将来的な見通しはあるのか？
- A) 現在、研究サイドで予想している将来的なFBRでの適用箇所として、機器接触・摺動部材、熱応力緩和材、サポート部材、断熱部材、原子炉容器とガードベッセルとの間の詰物、各種炉内構造部材、燃料サイクル施設への反映等を考えている。

- Q) セラミックス材料は、破壊靱性値が低いと思われるが？
- A) 金属材料に比べてセラミックス材料は、破壊靱性値が低いが、現在大学等で多くの研究者が靱性向上の為の研究を行っている。我々はこれらの研究者の協力を得つつ、靱性改善の研究努力を今後実施していきたい。
一方、靱性改善が困難な場合であっても、セラミックスは圧縮応力に対しては優れた特性を有するので、圧縮応力場では、適用が可能と考えている。

- Q) 傾斜機能材料についての見通しは？
- A) これまでステンレスとセラミックス材料の組み合わせを代表して製造プロセスの研究を行ってきたが、このプロセス開発は非常に困難を伴う課題であると認識している。セラミックスの割れやすさを避けるために、現在別途に金属材料／金属材料の傾斜機能材料の研究も始めている。

- Q) 傾斜機能材料の研究で板厚方向で温度差のある報告はあったが、長さ方向あるいは、表面の半径方向で温度差のある場合はどうなるのか？
- A) 半径方向に傾斜組成を持つ材料のプロセス開発は、より一層の困難性があると思われる。

Q) 本研究で創製した遮蔽材のコストは？

A) 既存の材料よりコスト的には高くなる。コストは追求する性能との兼ね合いで高性能なものは高くなっても、しかたがない。例えば、ある発熱部を遮蔽する際に接近するのに十分な距離がとれない場合又は施設をコンパクトにする必要がある場合には、本研究で創成した耐熱性を有する遮蔽材を利用すれば、これらの事が実現できる。

C) 適材適所に材料を配置することが必要である。

(7) 消滅処理研究

Q) 10^4 強さの異なる放射線を同時に測定するには、どのような手法を用いたのか？

A) 通常のGe検出器を用いたガンマ線分光法を用いた。プレアンプには、トランジスタリセット型のものを使用するとともに速いA/D変換器を用いた。1960年代当時の測定に比べ、A/D変換器の速度はかなり速くなっており、これにより計測の不感時間を小さくすることが出来た。この結果、非常に強いガンマ線と微弱なガンマ線を同時に測定することが出来た。

Q) 中性子断面積の測定値が、1960年代のものと大きく異なっているが、どちらのデータが正しいのか確認する必要がある。

A) 過去のデータは、 ^{90}Sr を例にとると、論文となっておらず、概略しか報告されていない。過去のデータは、誤差が大きく精度が悪い。過去のデータの誤差を約1.5倍すると、我々のデータと誤差の範囲で一致する。

(8) 大電力電子線形加速器の開発

Q) ビーム利用計画において、エネルギーブースターの加速エネルギーを100MeVより高めないのか？そのほうが陽電子など発生効率が高いのではないか？

A) その通りである。しかしながら計画している施設の大きさ、他の実験施設との関連で100MeVの加速エネルギーを計画している。

7. アンケート結果

第 I 期 フロンティア研究成果報告会アンケート結果

第 I 期フロンティア研究成果報告会に参加頂いた関係者（関連するメーカー）から 7 名の回答を得た。これらのアンケート結果をまとめると以下の通りになった。

1. 本日の報告会の講演内容について

	分かりやすい	難しい	どちらでもない
① フロンティア研究の概要	<input type="checkbox"/> 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
② 特別講演「極限技術と材料」	<input type="checkbox"/> 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
③ レーザー同位体分離技術	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2
④ レーザー溶液化学技術	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 2
⑤ 自律型運転制御システムの開発	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 2
⑥ 新概念高速炉の研究	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/>
⑦ フラールンに関する研究	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 1
⑧ 原子力用新材料の創製	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 3
⑨ 消滅処理研究	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 2
⑩ 大電力電子線形加速器の開発	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2

2. 今後の報告会の構成等に関するご意見、ご希望

- 2 報告時間を長くし、内容を充実させる
- 4 フロンティア研究の概要、研究計画等をもっと詳しくする
- 1 現状の通りで良い

3. その他ご意見、ご希望

- ・新しい研究に大変感銘を受けました。
- ・大学、研究所関係者を対象とした報告会であれば、もう少し時間をとっても良いと思いました（内容重視）。一般の人も含め PR が重点であれば、研究の狙いをもう少し分かりやすく時間をとる方が良いと思いました。（技術トレンド重視）
- ・質疑の時間をもう少しとった方が良い。
- ・最先端の研究は専門的になりすぎるため、専門外の人には難しく感じてしまいます。各研究の概要、特に最終的な目標やそこに至るまでの手法などを詳しくした上で現

状の達成した成果を説明して頂ければ良かったと思います。

- どの程度の規模で実施しているのかの説明が望まれる。また、研究の成果の応用について、夢のある目標を掲げてほしかった。是非次回も聴講したい。
- 正直いって、このような基礎研究が行われているとは、思っていませんでした。今後これらの技術の応用を含めて、さらに研究を続けて頂きたいと思います。次回も是非進捗状況を聞かせて頂きたいと思います。
- いろんな内容の研究をされているのに感心しました。もっと広い会場で多くの方が参加できればと思いました。

付録 「第Ⅰ期フロンティア
研究成果報告会（要旨集）」

第Ⅰ期フロンティア研究成果報告会
(要 旨 集)

1995年11月20日

動力炉・核燃料開発事業団

第Ⅰ期フロンティア研究成果報告会 要旨集

目次

1. 研究成果報告会の開催に際して 動力炉・核燃料開発事業団 1
理事 井田勝久
2. フロンティア研究の概要 核燃料サイクル技術開発部 3
部長 山村 修
3. 研究成果報告
 - (1) レーザー同位体分離技術 東海事業所 新型濃縮技術開発室 4
－物質の極限分離への応用－ 室長代理 須藤 収
 - (2) 光溶液化学の研究 東海事業所 先端技術開発室 6
－光で制御する溶液反応－ 室長 和田幸男
 - (3) 自律型運転制御システムの開発 大洗工学センター 先進技術開発室 8
－運転員の代替を目指して－ 担当役 小澤健二
 - (4) 新概念高速炉の研究 大洗工学センター 先進技術開発室 10
－高速炉の多目的利用を目指して－ 担当役 大坪 章
 - (5) フラーレンに関する研究 東海事業所 先端技術開発室 12
－新しい炭素機能材料を求めて－ 室長代理 船坂英之
 - (6) 原子力用新材料の創製 大洗工学センター 先進技術開発室 14
－極限環境に耐える材料を目指して－ 担当役 加納茂機
4. 最近のトピックス
－核分裂生成物の放射能を消滅させる－
 - (1) 消滅処理研究 東海事業所 先端技術開発室 16
副主任研究員 原田秀郎
 - (2) 大電力電子線形加速器の開発 大洗工学センター 先進技術開発室 18
担当役 江本 隆

研究成果報告会の開催に際して

動力炉・核燃料開発事業団

理事 井田勝久

本日はご多忙中のところ、第Ⅰ期フロンティア研究成果報告会にご出席いただき大変ありがとうございます。また、事業団の業務につきましても、日頃から格別のご指導、ご協力をいただき厚く御礼申し上げます。

事業団では、原子力開発利用長期計画に基づき、昭和62年頃から原子力の基盤技術に係わる研究開発として、大学、国立研究機関等との協力のもと、フロンティア研究に取り組んでまいりました。平成6年度にはこれら第Ⅰ期研究の成果がまとまり、これを機会に皆様方のご理解の一助とさせていただきたく、研究成果報告会を開催することにいたしました。

フロンティア研究については、次世代の新しい原子力技術を生み出す原動力になるとともに、経済性・信頼性の一層の向上に寄与できるものと期待し、事業団では長期的な視点に立って研究開発を進めて行く所存でございます。今後とも皆様方の一層のご理解とご支援を賜りたく、よろしくお願い申し上げます。

フロンティア研究の概要

核燃料サイクル技術開発部

部長 山村 修

原子力長期計画では、既存の原子力技術にブレークスルーを引き起こす可能性のあるフロンティア領域や将来の新たな技術開発の進展を生み出す基盤を形成する技術領域について研究を重点的に進め、幅広い技術基盤の強化を図ることとしている。

事業団では、これまでプロジェクトの研究開発によって蓄積された技術基盤に立脚し、より一層の実用化の促進を図るため、創造的・革新的研究開発を推進すべく昭和62年頃からこれらをフロンティア研究と名付けて精力的に取り組んできた。フロンティア研究には、新概念の創出に係わる研究開発及び共通的な基盤技術開発があり、共に次世代の新しい原子力技術を創出する源と位置づけ、長期的な視点に立って研究開発を進めている。

新概念創出に係わる研究には、「核種分離・消滅処理」、「新概念高速炉」があり、高レベル放射性廃棄物に含まれる有用核種の分離回収・利用技術開発、大電力電子線形加速器の開発及び深海、離島などの局地で利用できる小型可搬型炉の概念構築を進めている。

また、基盤技術開発には「人工知能」、「新材料」、「レーザー」、「知的支援」、「計算科学」、「ビーム利用」の研究領域があり、国の原子力基盤クロスオーバー研究を中心に各研究機関と連携をとりつつ以下の研究を進めている。

人工知能については、原子力プラントの運転制御及び保守について人間の判断を介在させず、自動的に対処できる自律型プラントの実現を目標として研究開発を進めている。

新材料については、次世代原子力プラントの経済性を大幅に向上させるため、傾斜機能材料、超耐熱合金、セラミックス、また、新機能材料として期待される炭素化合物フラーレンの研究などを進めている。

レーザーについては、再処理工程の高度化及び簡素化の可能性を探るため、レーザーによるプルトニウム、ネプツニウムなどの原子価調整、また、レーザー光を用いた同位体分離の研究開発を進めている。

知的支援では、原子力プラントの運転員が未知・未経験の事象に遭遇した場合でも、それに十分対応できるようプラントに対する人間の理解に関する認知科学的知見に基づいた支援方策の研究を進めている。

計算科学では、原子力分野における流体-構造系における複雑現象、構造物の挙動と劣化・損傷形態を予測するなどのアルゴリズム、シミュレーション技術に関する研究を進めている。

ビーム利用に関しては、原子力材料開発を進める手段として材料のキャラクタリゼーションに有効な陽電子ビームを電子線形加速器で発生させ、損失なく収束、輸送する技術開発を進めている。

本成果報告会では、これらの研究テーマのうち主なものについて、平成6年度までの成果の概要を報告するとともに、最近のトピックスとして、現在建設を進めている大電力電子線形加速器及び消滅処理研究について紹介する。

レーザー同位体分離技術

—物質の極限分離への応用—

東海事業所 新型濃縮技術開発室

室長代理 須藤 収

1. 目的

分別蒸留法や化学交換法などの統計的同位体分離法では、一段当たりの分離係数が水素の場合を除けば、ほとんど1に近く、濃縮度の高い同位体を得るためには多くの分離段数が必要となり、高コストにつながっている。これに対して個別的同位体分離法であるレーザー法は、着目する同位体のみを選択的に励起することから、一段当たりの分離係数が非常に高く、必要な濃縮度の同位体を低コストで得られる可能性がある。

このレーザー同位体分離法の利点に着目し、経済性に優れた次世代ウラン濃縮技術や再処理、高速炉燃料開発など核燃料サイクル全般へのレーザー技術の応用を目指す。

2. 概要及び成果

レーザー同位体分離の研究は昭和63年度から開始し、①次世代のウラン濃縮技術である分子レーザー法開発、②再処理技術への応用として、再処理工程から放出される放射性気体 $^{14}\text{C}\text{O}_2$ の分離除去及び再処理不溶解残渣に含まれる有用金属パラジウム(Pd)中の放射性同位体 ^{107}Pd の分離除去に関する研究を行ってきた。

(1)分子レーザー法ウラン濃縮技術開発⁽¹⁾

赤外多光子吸収を利用して、 $^{235}\text{UF}_6$ の振動エネルギー状態をパルス炭酸ガスレーザーのパラ水素ラマン変換光により選択的に励起し、光解離した固体の UF_6 を製品として回収する分離法である。これまでに、分子線発生装置と多光イオン化/飛行時間型質量分析計を組み合わせた分離特性試験装置(図1、写真1)を用い、原理的分離性能として分離係数約1.5を達成した。

(2) ^{14}C のレーザー同位体分離

作業物質として CF_2HCl を用い、パルス炭酸ガスレーザーによる赤外多光子吸収により CF_2 と HCl に光解離し、励起状態の CF_2 の再結合で生成する C_2F_4 中に ^{14}C が濃縮される。これまで、基礎試験において分離係数約2.30を達成した。

(3) ^{107}Pd のレーザー同位体分離⁽²⁾

原子が円偏光の光を吸収する時の角運動量選択則と核スピンにより生じるエネルギー準位の超微細構造(図2)を利用して、左旋回の円偏光レーザー光により核スピンの0でない ^{105}Pd 及び ^{107}Pd を核スピンの0のPd同位体($^{104}, ^{106}, ^{108}, ^{110}\text{Pd}$)から分離する方法について基礎的研究を行った。天然組成のPdを原料として ^{105}Pd の分離試験(図3)を行った結果、分離係数約1.0を達成した。

⁽¹⁾ O. Suto, H. Yamaguchi, K. Tashiro, S. Kawakami and Y. Shimazaki, Proceedings of the 6th International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research, vol. 1, 304 (1994)

⁽²⁾ 山口大美、「パラジウムのレーザー同位体分離」動燃技報 No. 92 (1994)

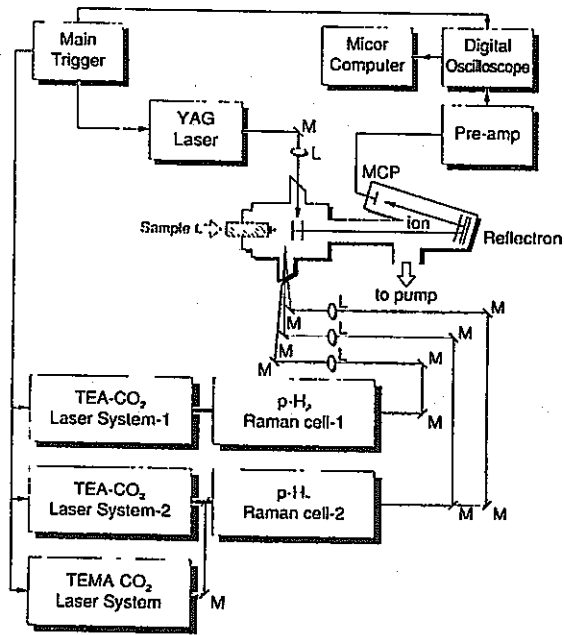


図1 分離特性試験の装置構成概略
(分子レーザー法ウラン濃縮)

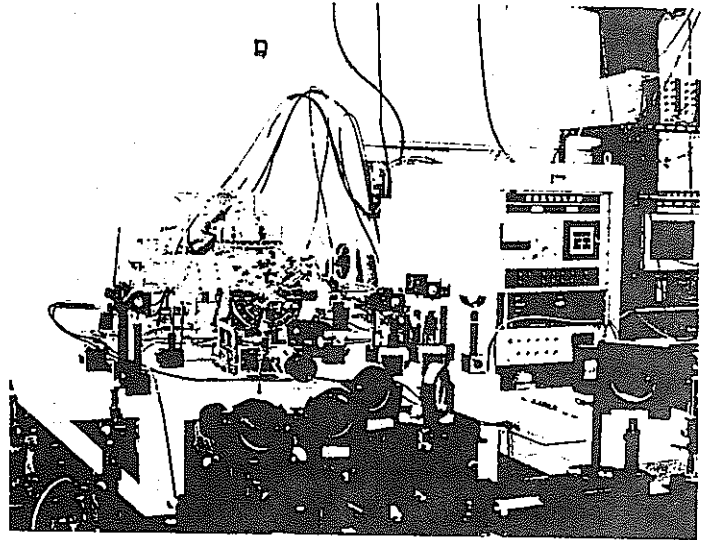


写真1 分離特性試験装置
(分子レーザー法ウラン濃縮)

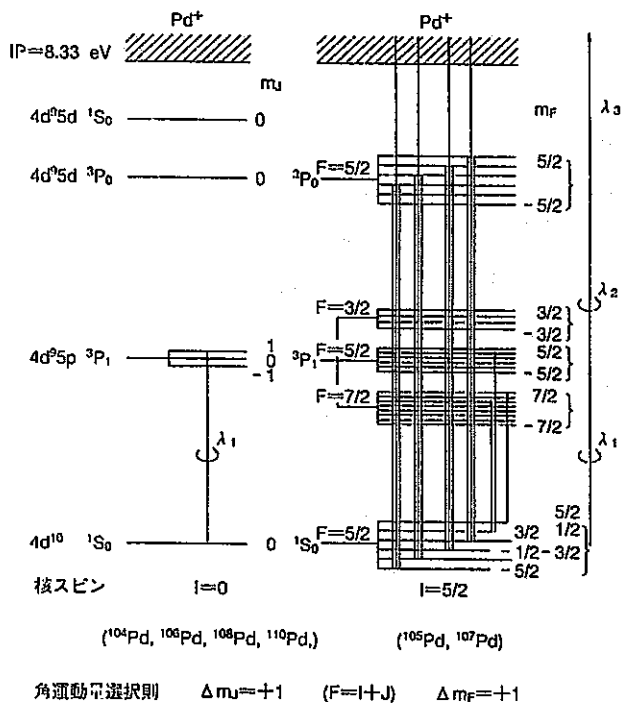


図2 Pdのエネルギーレベルダイアグラム

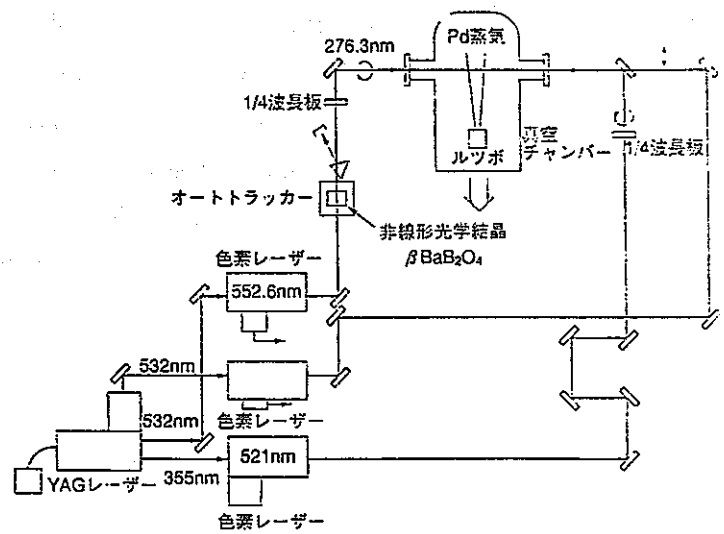


図3 Pd 同位体分離試験の装置構成概略

光溶液化学の研究

—光で制御する溶液反応—

東海事業所 先端技術開発室

室長 和田幸男

1. 目的

光は時間及び空間的に最もエネルギーを集中でき、しかも任意に出力及び波長等を制御できるものである。一方、溶液中に溶存する多くの物質は各々の化学形態に応じて固有の波長の光を吸収する。これらの特性を利用し、硝酸等の溶液中に溶存するU、Pu、Np等のアクチニド元素について原子価を光化学的に調整し、相互分離及び共抽出の原理実証研究を行うとともに、光化学反応メカニズムを検討する。

2. 概要及び成果

PuとNpの混合硝酸溶液に紫外光（超高圧水銀ランプ）を照射し、PuとNpの原子価を30% TBP/n-dodecane 溶媒中に抽出性の原子価Pu（IV，VI）、Np（VI）、又は非抽出性の原子価Pu（III）、Np（V）に光化学的に調整することを試み、また、その光化学反応メカニズムを検討した⁽¹⁾。その結果、微量の還元剤及び亜硝酸分解剤の存在下で、光照射により分離及び共抽出に必要な原子価条件に調整できることが明らかになった^{(1) (2)}。図1は、Pu-Np混合硝酸溶液の共抽出条件のPu（IV，VI）-Np（VI）に光化学的に原子価が調整された結果を示す。さらに光照射-溶媒抽出操作によりPuとNpの分離及び共抽出が高い分配効率で可能なことを実証した。

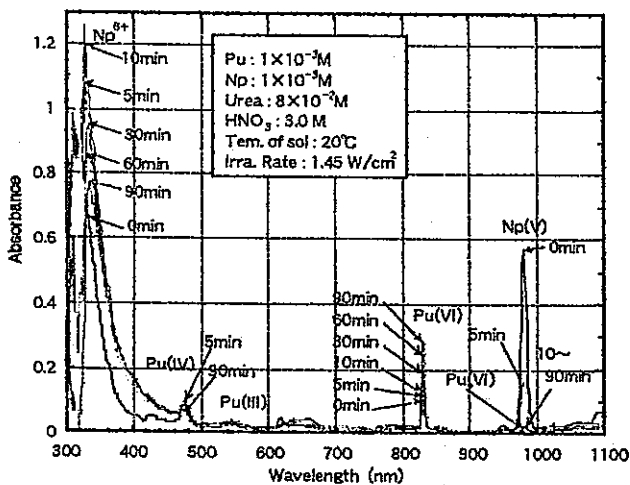
これら硝酸溶液中での光化学反応メカニズムを解析した結果、光励起硝酸イオン種である *NO_3^- の強い酸化力の効果を初めて確認した。

この光励起硝酸イオン種の強い酸化力を実証する例として、 UO_2 粉末の室温（20℃）での光化学溶解試験を行った。その結果、光照射のみで100℃の加熱溶解に匹敵する溶解速度係数 $3.50 \times 10^{-6} (\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$ を得た。図2は UO_2 10mgを3M-HNO₃ 2ml、室温（20℃）の条件下で光照射強度を実験パラメータとしたときの結果である。図2から光化学溶解速度は光照射強度と共に増加することが分かる。

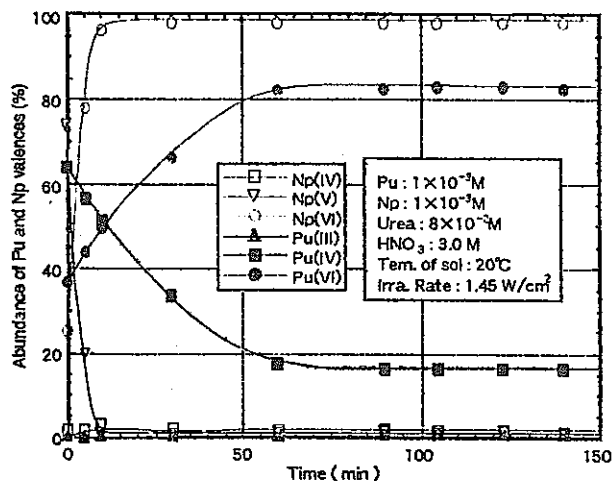
以上のように、光化学は再処理をはじめとする核燃料サイクル技術の高度化、簡素化、廃棄物低減化等の利点が考えられ⁽²⁾、今後さらに、その応用可能性を追求することが重要である。

⁽¹⁾ Y. WADA, H. TOMIYASU, et al. : J. Nucl. Sci. Tech., 31[7], 700(1994)

⁽²⁾ Y. WADA, H. TOMIYASU, et al. : Radiochi. Acta, 68, 233(1995)

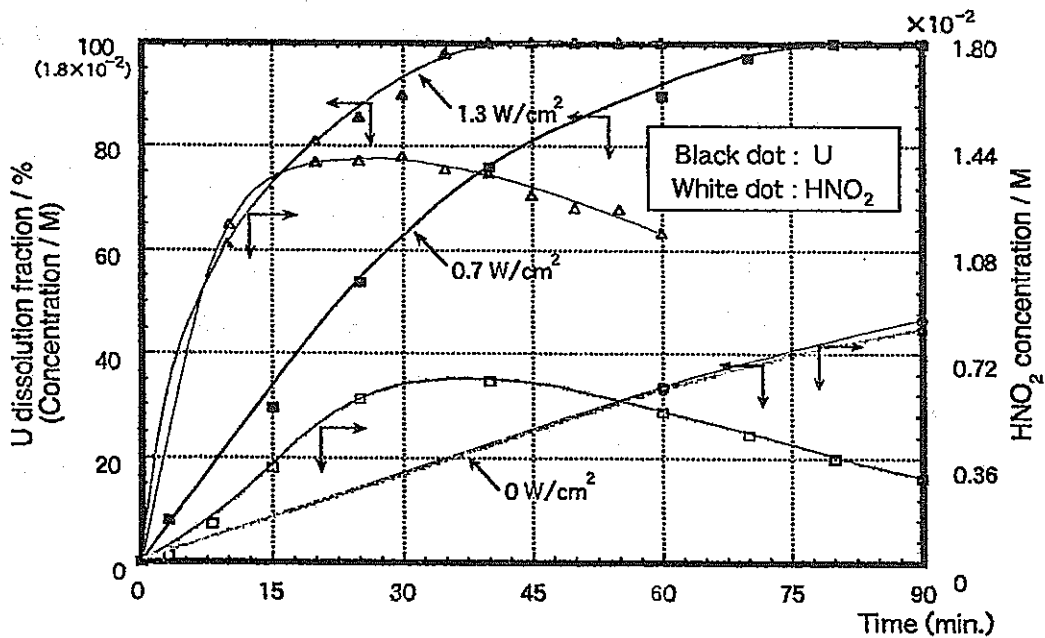


(a) Change in absorption spectra



(b) Change in abundance of valences

図1 尿素を含むPu,Np混合3M HNO₃溶液の光化学反応 (共抽出条件)



Irra.rate(Hg lamp): 0W/cm²; ● and ○, 0.7W/cm²; ■ and □, 1.3W/cm²; ▲ and △,
Weight of UO₂: 10mg, Vol. of sol.: 2ml

図2 光照射率変化によるUO₂粉末の3M HNO₃,20°Cにおける光化学溶解曲線の比較

自律型運転制御システムの開発

－ 運転員の代替を目指して－

大洗工学センター 先進技術開発室

担当役 小澤健二

1. 目的

自律型運転制御システムの開発は、既存の原子力プラントにおいて運転員が果たしている役割を人工知能（AI）に代替することによって、人的因子を極力排除し、安全性や稼働率を向上させることを目的としている。その第一段階としてプロトタイプシステムの開発を行い、異常時のAIによる運転操作を実現し、原子力プラントへのAIの適用性を評価することにより自律型運転制御システムを実現する。

2. 概要及び成果

自律型運転制御システムの開発は、運転員の知識ベースレベルの判断をAIによって実現するため、扱うべき対象を明示的に記述したモデルに基づく①モデルベースアプローチを採用すること、自己組織化に関連したシステムの動的な再組織化を実現するため、②階層型分散マルチエージェントシステム構成とする、また、原理の異なる複数のエージェントを同一対象に対し重複して適用し、共通要因故障の防止と相互バックアップを実現するため、③方式の多様化を図ることを基本方針とした。

プロトタイプシステム⁽¹⁾は、炉型FBRプラントを対象とし、危険分散、システム機能の動的な再配列、自己診断、保守の局所化との整合性などの点を考慮して、階層型の分散マルチエージェントシステム構成とした。最上位に運転目標の設定を担うプラント管理部を配置し、その下位にプラント全体に係わる診断/制御部を担うプラントレベル診断/制御部、そして、その下位には、例えば、蒸気発生器等の機器の診断/制御を行うローカルレベル診断/制御部を配置、さらに、その下位には、センサ、アクチュエータといった機器類を配置した。ここでのプラント診断/制御は、プラント機能を階層的に構造化した機能階層モデル、プラント運用方策と運用手順を階層構造表現した運転戦略階層モデルに基づいて行った。一方、マンマシンインターフェースは、これら4階層に構成された各診断/制御部の動作状況を効果的にコンソールパネル上に表示させた。

プロトタイプシステムの開発を通じて、自律型運転制御システムへの要素技術としてのAIの適用性と有効性を見通しを得ることが出来た。今後は、プロトタイプシステムの総合検証、評価を行うとともに、診断/制御の高度化、信頼性向上のために、原理の異なる方式の採用と合理的な合意形成機構、さらには未経験事象に対応すべく学習による知識の更新、修正、また、知識の再利用、再構成機構の開発を目指す。

⁽¹⁾ 小澤他、「知的運転制御システムの開発」電気学会研究会 NE-95-15(1995)

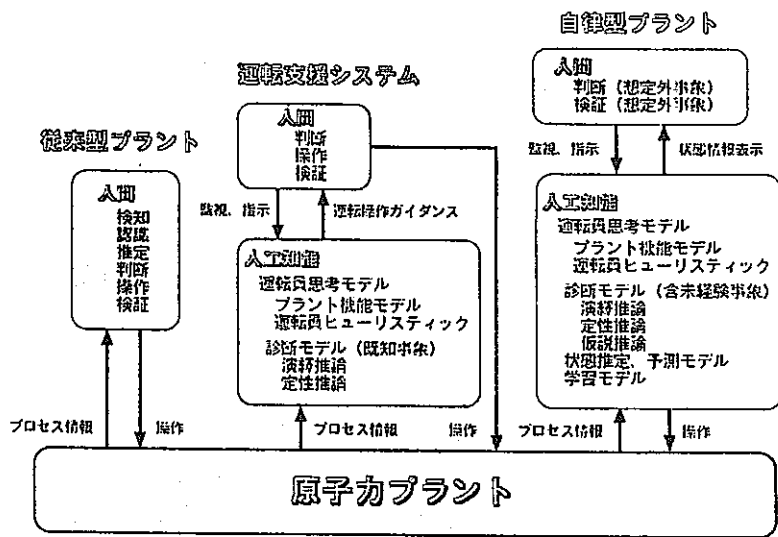


図1 自律型プラントの位置付け

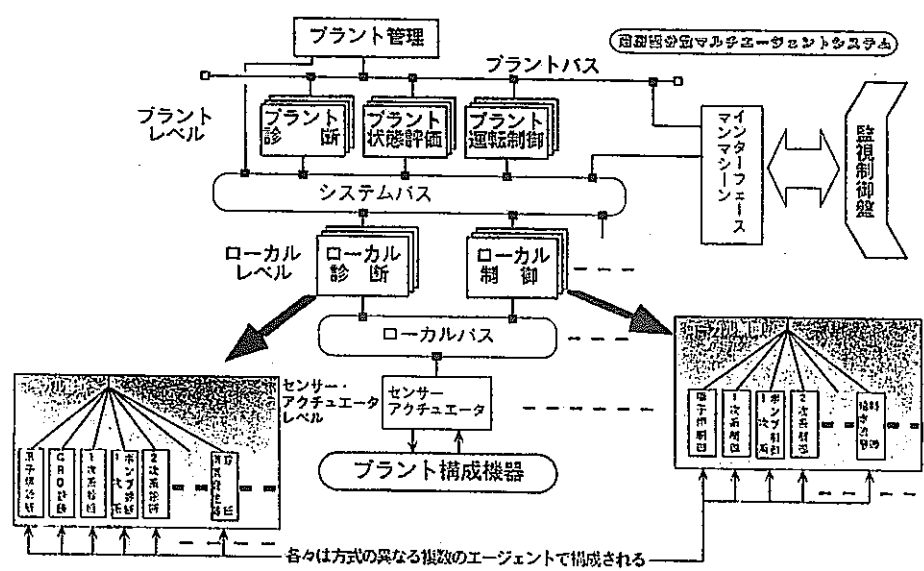
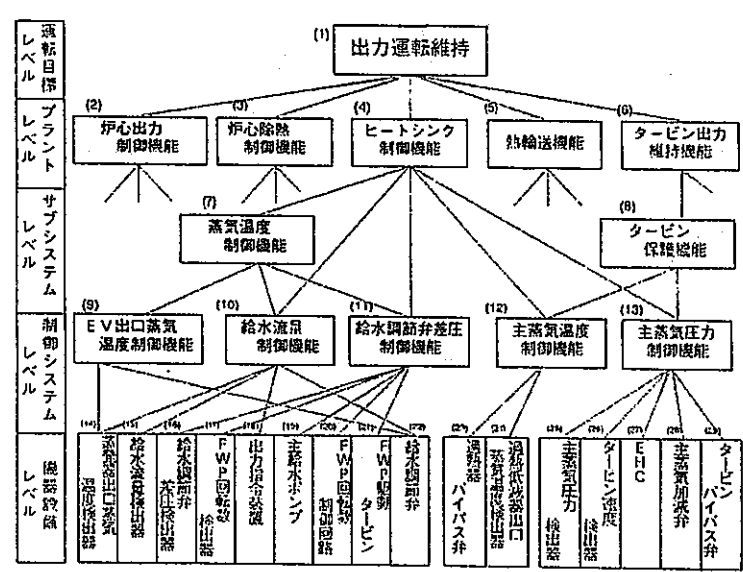


図2 自律型運転制御システムの機能構成



運転員思考モデルに基づくプラント機能階層化モデル

新概念高速炉の研究

—高速炉の多目的利用を目指して—

大洗工学センター 先進技術開発室

担当役 大坪 章

1. 目的

新概念高速炉として、深海等で利用可能な可搬型炉を取り上げ、その設計概念を構築した。深海等では、従来使用されてきた電池を始めとする非原子力エネルギーでは性能に限界がある。これを克服し、深海等での各種観測データの量及び質を飛躍的に向上させることが目的である。

2. 概要及び成果

深海用可搬型炉（深海炉）は図1に示すように深海の数百気圧の外圧に耐えるように、小型炉システム全体を厚さ数cmのチタン合金製の耐圧殻の中に設置したものである。一次系はナック冷却の小型高速炉であり、二次系はヘリウム-キセノンガスを使用した密閉ブレイトンサイクルである。システムの構造材としては鉄・ニッケル合金を使用する。システムからの排熱は、耐圧殻内面の冷却器から、耐圧殻中を熱伝導で伝熱し、海水中に放熱される。また、このシステムはベローズ式のアキュムレータにより炉容器の内外圧が均等に保たれているため、万一、耐圧殻内に海水が漏洩し、耐圧殻内が高圧状態になったときでも、炉容器の健全性は保たれる。本システムは、ほぼ現在の技術の組み合わせで開発可能なものである。また、このような可搬型炉は低出力であるため、目標とする1回の運転期間となる10年間でも、炉心内に発生する核分裂生成物の量は極めて少量である⁽¹⁾。

図2に深海炉の利用法の一つとして、長期気候予測用の無人海底観測基地を示す。現在世界の気象研究者は、近年発達が著しい大型計算機を使用した数年から百年先の気候を予測するための大気・海洋結合モデルを鋭意開発しているところである。このためには、数多くの海洋観測データが必要とされる。図2ではメイン（表層）ブイで海底から海面までの約百点の温度、塩分、密度を、中層ブイでは海洋微生物の沈降量を測定する。低層ブイでは深層水の化学試験用取水を行う。さらに自航式潜水機では、200-300km離れた場所までの温度、塩分、密度を測定するとともに、北極海においては氷の厚さの時間的変化を約1週間毎に測定する。

深海炉の他の利用法としては、図1の規模の炉の場合、地球科学研究および地震観測のための無人基地がある。さらに、将来を考えると、数百KWの深海炉の場合の利用法としては、深海炭酸ガス貯蔵、深海バイオ工場等がある。

⁽¹⁾ 大坪他、「高速炉を用いた深海用動力源の成立性の検討」日本原子力学会誌 vol. 34, No. 10 (1992)

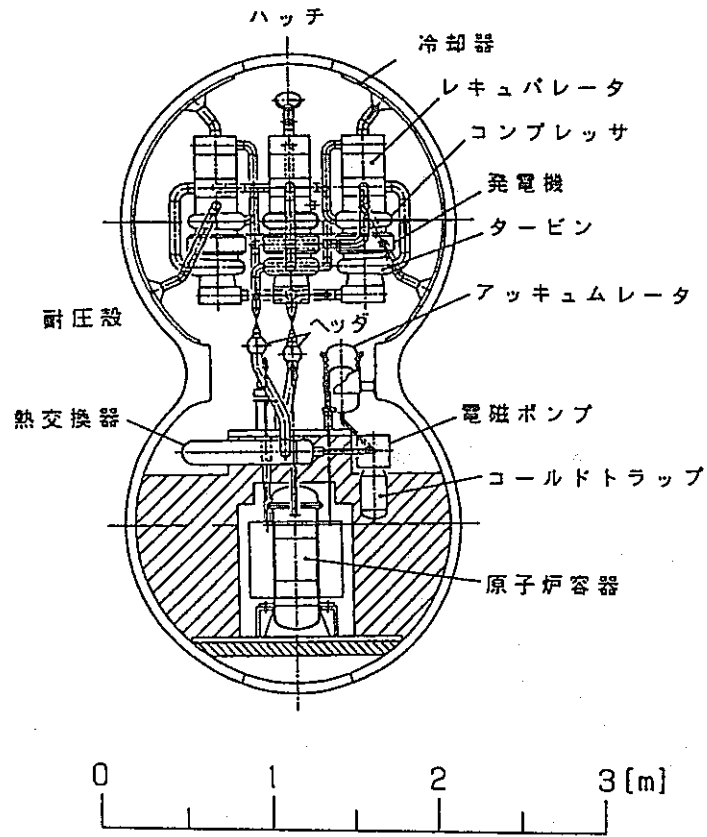


図1 20-40 kW深海炉

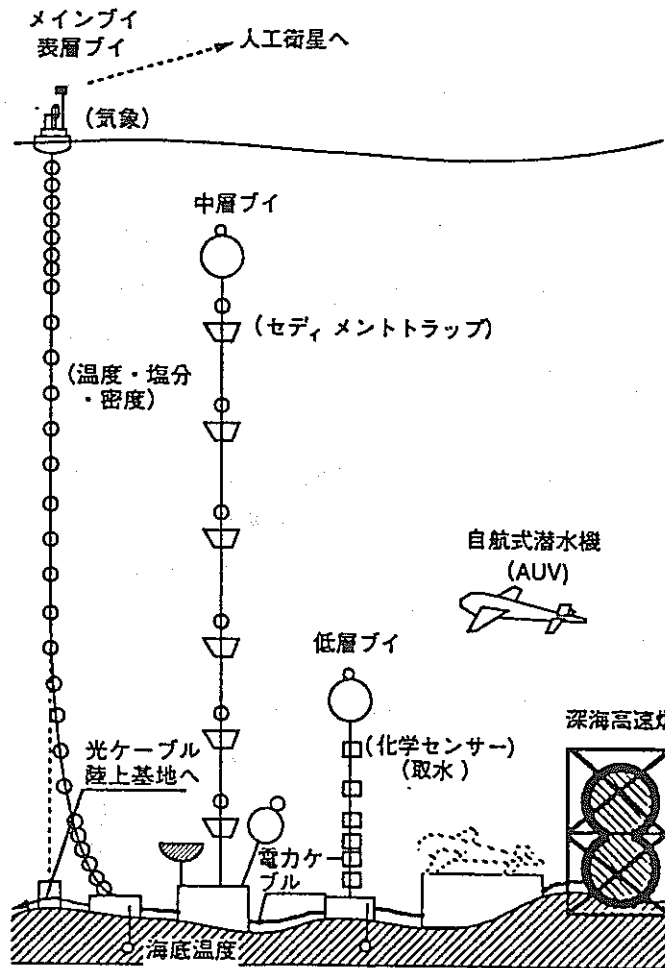


図2 長期気候予測用無人海底基地

フラーレンに関する研究

—新しい炭素機能材料を求めて—

東海事業所 先端技術開発室

室長代理 船坂英之

1. 目的

フラーレンとは、炭素原子が 100個程度集まって中空状の分子骨格（サッカーボール形状）をとる炭素クラスターの総称である。このフラーレンよりもサイズが約 2 桁大きいものはナノ粒子と呼ばれている。これらはダイヤモンドやグラファイトと並ぶ新しい炭素の同素体であり、従来の物質にはない優れた性質を発揮する可能性を秘めているとして世界中で精力的な研究がなされている。とりわけこれらのフラーレンやナノ粒子の中空部分に金属を取り込んだものは、内包した金属原子が原子核、炭素層が電子の役割を果たす「人工疑似元素」と見ることもでき、アクチニド元素やランタニド元素を内包させることによって、今までにない新しい機能を有する材料として応用が考えられる。

これらのアクチニド金属内包ナノ粒子、ランタニド金属内包フラーレンに着目し、原子力分野での応用を目指して、その合成と特性に関する研究を行う。

2. 概要及び成果

本研究はナノ粒子の中に～10000 個のアクチニド金属元素を取り込んだ金属内包ナノ粒子に関するものと、フラーレンに 1 個のランタニド金属元素を内包した金属内包フラーレンに関するものに大別することができる。

(1)アクチニド金属内包ナノ粒子研究

金属内包ナノ粒子については、従来ランタニド金属が炭化物、鉄系元素が金属の形態で内包されることが報告されているにすぎなかった。蒸気圧が低いアクチニド元素について、アークプラズマ温度を高くするなど合成条件を精緻に調整することにより、ウラン、トリウム元素を内包したナノ粒子の合成に初めて成功した（図 1）⁽¹⁾。

(2)ランタニド金属内包フラーレン研究

$M@C_{60}$ （M：ランタニド金属）金属内包フラーレン（図 2）は C_{60} 、 C_{70} に比べて生成量が極めて少ないことや、多くの内包元素のないフラーレンと異性体の混在から、従来マクロ量の分離精製は困難とされ、このことが金属内包フラーレン研究の進展を阻む大きな問題となっていた。抽出溶媒として 1, 2, 4 トリクロロベンゼンが最も優れていることを見出すとともに、異性体の分離能力が高いピレン型カラムを用いた高速液体クロマトグラフィー法の採用により初めて金属内包フラーレンのグラムオーダーの分離精製に成功した。これは従来報告されている手法に比べて約 2 桁近く効率が高い。また、これを試料としてランタニド金属内包フラーレンの磁気特性の測定や誘導体の合成⁽²⁾を世界に先駆けて行うことにより、金属内包フラーレンの物性研究の道を切り開いた。

⁽¹⁾ H. Funasaka, K. Sugiyama, K. Yamamoto, T. Takahashi: J. App. Phys., 78, 5320(1995)

⁽²⁾ T. Akasaka, K. Yamamoto, H. Funasaka, T. Takahashi: Nature, 374, 600(1995)

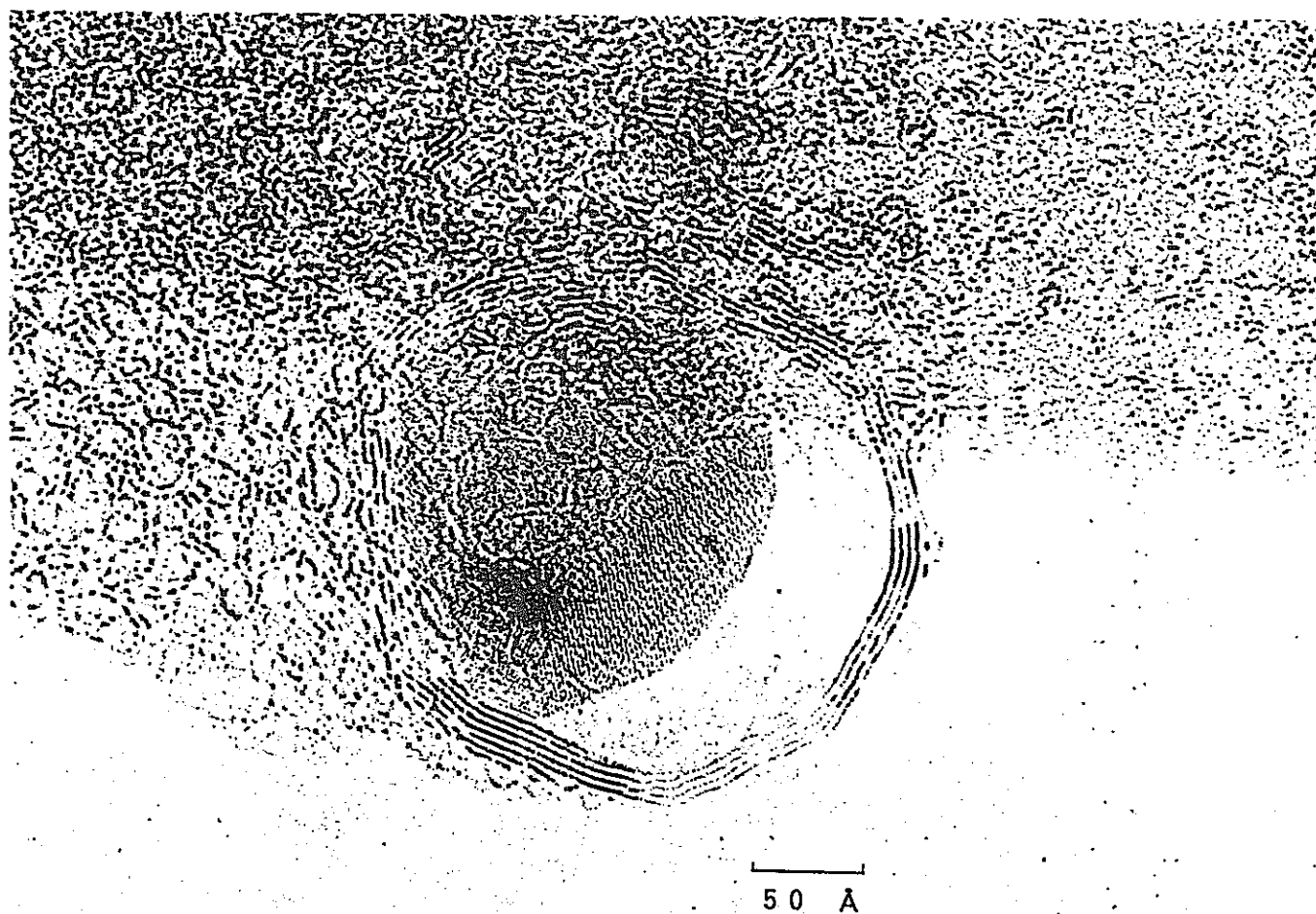


図1 ウラン炭化物内包ナノ粒子の透過型電子顕微鏡像

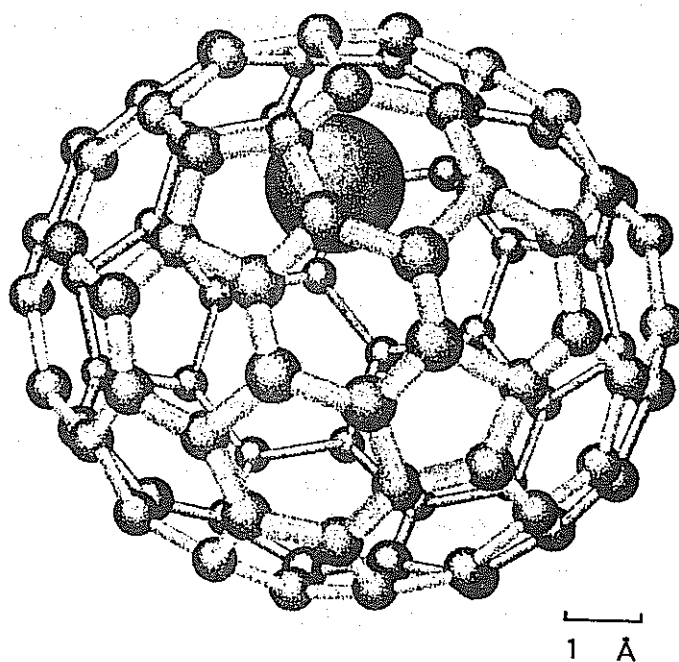


図2 金属内包フラーレン (La@C₈₂)の模式図

原子力用新材料の創製

— 極限環境に耐える材料を目指して —

大洗工学センター 先進技術開発室

担当役 加納茂機

1. 目的

高速炉の高度化（高耐食性、長寿命等）を目的とし、高速炉環境に適用可能なセラミックス、傾斜機能材、高性能遮蔽材、高性能制御材を探索・創製するため、新成分系の材料設計、製造プロセス開発、試作材の耐食性、強度特性等の評価及び材料改良方策の検討を行う。

2. 概要及び成果

(1) セラミックス

高速炉環境で優れた耐食性を有するセラミックスを探索するため、単結晶、CVD 法及び焼結法による各種セラミックスについて、550及び650 °Cで最長4000時間のNa中腐食試験を行い、腐食特性の評価と耐食性向上のための改良方策を検討した。単結晶、CVD 材に比べ焼結セラミックスの腐食量は大きく、酸化物系よりも非酸化物系の方が腐食量の温度及び時間依存性が顕著であった。MgO, Y₂O₃, AlN等は優れた耐食性を示したが、構造用セラミックスのAl₂O₃, Si₃N₄, SiC, Sialonは著しい粒界腐食を示した。腐食機構を検討した結果、耐食性向上には不純物及びSiO₂の低減、粒界の結晶化等が不可欠であることを明らかにした⁽¹⁾。

(2) 傾斜機能材

熱応力緩和用傾斜機能材を創製するため、材料に発生する熱応力を低減する観点から成分設計を解析プログラム FINAS により行うと共に、粉末冶金法による製造プロセスの検討を行った。PSZ/SUS 系傾斜機能材の物性値を成分比及び温度の関数として定式化し、熱応力の非定常・弾塑性解析を行い、高温度落差場では遮熱性重視型傾斜機能材が、高熱流束環境下では熱伝達性能重視型傾斜機能材が、熱応力緩和に有効であることを見出した。

(3) 高性能遮蔽材

放射線環境は場所によりγ線、中性子の存在割合や強度等が異なる。各々の環境に最も適し、耐熱性を持つ遮蔽材を創製するため、高速中性子、熱中性子及び中性子とγ線の同時遮蔽の必要な放射線環境を想定し、遮蔽コードによる成分設計を行い最適成分系を選定した。各種放射線環境に応じ自在に遮蔽材の成分を変化させるために、粉末冶金法を適用し成形プロセス条件の最適化を行った。その結果、従来の遮蔽材より優れた耐熱性と機械的特性を有する遮蔽材創製の見通しを得た。

(4) 高性能制御材

従来の制御材（中性子吸収材）である¹⁰B₄Cよりも耐割れ性に優れ、長寿命の制御材を創製するため、ホットプレス法によるB₄C/金属複合材、杵素化合物、B₄C/SiC ウィスカーペレットの成形プロセスの開発と試作材の炉外特性評価を行った。ペレット成形プロセス条件の最適化を行うとともに、炉外特性評価を行い、B₄C/Cu-Ni, B₄C/Zr, B₄C/Mo, B₄C/SiC ウィスカーがB₄Cより耐割れ性に優れ、長寿命化できる見通しを得た。

⁽¹⁾ 加納他、「原子力用新素材の創製に関する研究」動燃技報 No. 91 (1994)

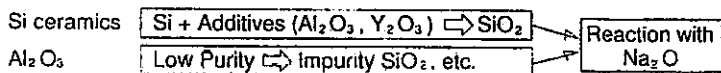
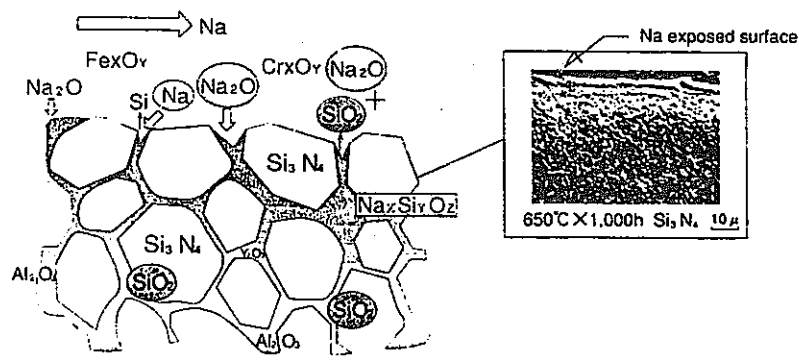


図1 セラミックスのNaによる腐食機構の概念図

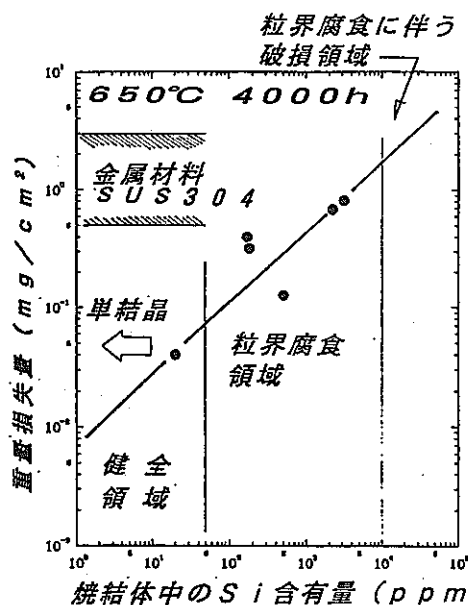


図2 Al₂O₃の重量損失と不純物Si量との関係

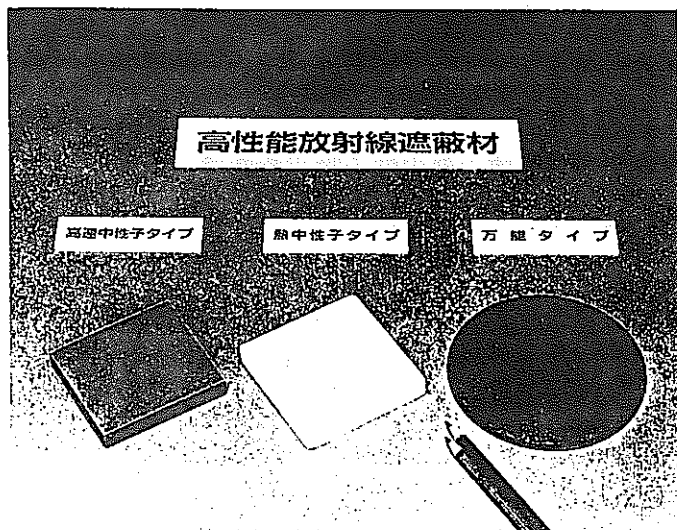


図3 高性能放射線遮蔽材試作材の外観

三次元構造体モデルによる非定常／弾・塑性解析
高熱流束環境

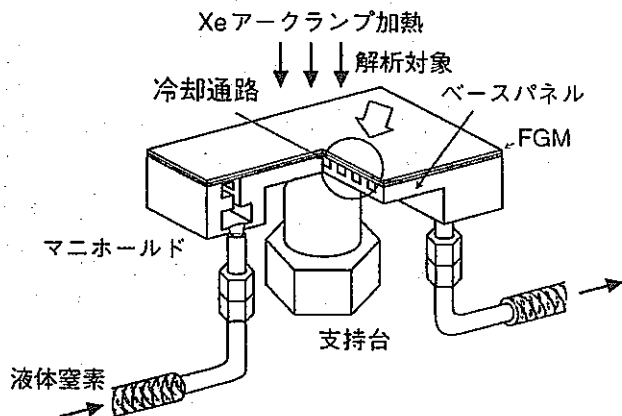


図4 傾斜機能材の非定常／弾塑性解析モデル

表1 高性能制御材の総合評価結果

Materials				Evaluation (Ranked)			
No.	Chemical Compositions	Mixing Ratio (vol%)	Smear Density** (%TD)	Thermal Conductivity	Thermal Shock Resistance	Hardness	Overall Evaluation
Ni40	B ₄ C/Ni	40 : 60	90	× 10	8	○ 4	×
Zr60	B ₄ C/Zr	60 : 40 40 : 60	90 90	◎ 4 ◎ 2	○ 5 6	○ 4 (Not Evaluated)	◎ 4 △
Mo80 Mo60	B ₄ C/Mo	80 : 20 60 : 40	90 90	× 9 ○ 5	(Not Evaluated) ◎ 2	8 ○ 4	(Not Evaluated) ◎ 2
Cu60LD Cu50LD Cu50HD	B ₄ C/Cu-Ni	60 : 40 50 : 50 50 : 50	80 80 90	× 10 7 ◎ 3	(Not Evaluated) (Not Evaluated) ◎ 1	◎ 1 ◎ 1 ◎ 3	(Not Evaluated) (Not Evaluated) ◎ 1
Eu	EuB ₆	—	90	○ 5	× 10	○ 7	×
Si	SiB ₆ *2	—	90	× 12	○ 4	9	○
Ti	TiB ₂	—	90	◎ 1	6	(Not Evaluated)	△
SiC	B ₄ C/SiC Wisker	80 : 20	90	(Not Evaluated)	◎ 3	(Not Evaluated)	◎ 3
—	B ₄ C(Ref.)	—	90	8	8	10	—

*1 Nominal Value

*2 Mixture of SiB₆ and Si

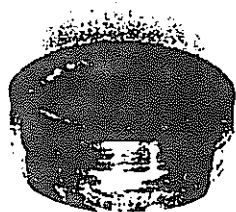


図5 Al₂O₃/SUS316系傾斜機能材試作材の外観

—核分裂生成物の放射能を消滅させる—

消滅処理研究

東海事業所 先端技術開発室
副主任研究員 原田秀郎

1. 目的

ガンマ線や中性子線等による核反応を積極的に利用し、高レベル放射性廃棄物を消滅処理させることは、その処分に伴う環境への負荷の低減の観点から、将来の技術として注目されている。

高レベル放射性廃棄物に含まれる核分裂生成物（FP）の中には、中性子照射による消滅処理が難しい核種が存在する。このような核種を消滅させるためのシステムを評価するため、これまで見落とされていた新しい核反応にも着目し、その適用可能性を検討するとともに、消滅処理評価に影響を与える基礎データの整備、蓄積を行う。

2. 概要

本研究では、消滅処理評価に大きな影響を与えるFP核種の熱中性子吸収断面積に関する実験的研究とガンマ線による消滅処理方法を評価するための光核反応微細構造に関する研究を進めている。

FPの熱中性子吸収断面積に関する研究では、同位体比測定法という新たな測定原理を用い、消滅処理で問題となる一連のFP核種に対し、中性子断面積を高い精度で測定することに成功した⁽¹⁾。表1に得られた結果を示す。 σ_0 は2200m/s 中性子に対する中性子吸収断面積であり、 I_0 は共鳴積分値である。核種によっては、過去のデータに比べて中性子吸収断面積が大きく異なっていることを見出した。

また、光核反応微細構造の研究では、ゲルマニウム検出器をベースとした高分解能高エネルギーガンマ線スペクトロメータ（HHS）を考案し、ターゲットを透過するガンマ線束を測定することにより、世界で初めて光核反応の微細構造を0.1%より高いエネルギー分解能で測定できることを数値シミュレーションで実証することができた⁽²⁾。

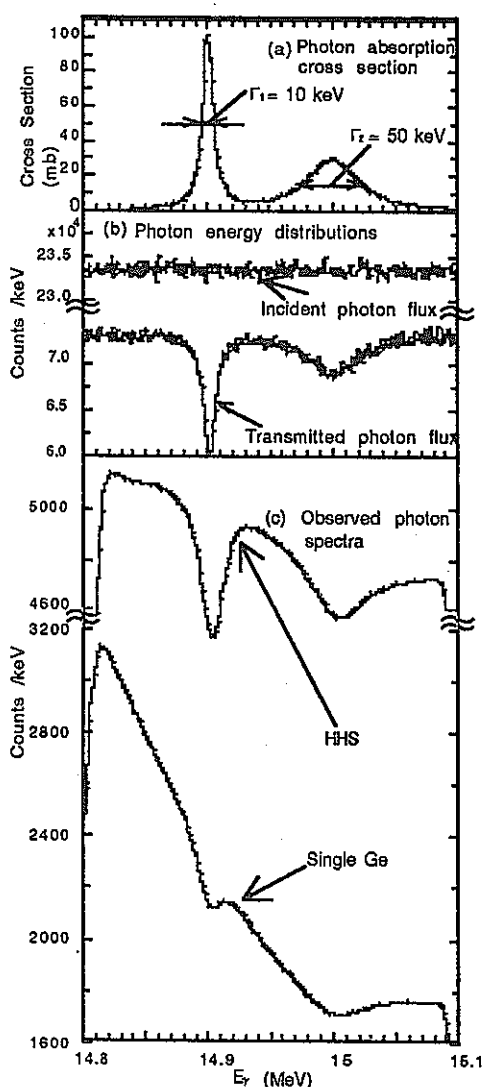
図1にシミュレーションの結果を示す。HHSを用いた測定により、10keV程度のエネルギー分解能で光核反応微細構造による吸収ピークを観測できることが示されている。

⁽¹⁾ H. Harada, et al. : J. Nucl. Sci. Tech., 31, 173(1994)

⁽²⁾ H. Harada, et al. : to be published in J. Nucl. Sci. Tech. 32, [11](1995)

表1 F Pの熱中性子吸収断面積
過去のデータとPNC測定値の比較を示す

核種	過去のデータ	PNCのデータ
^{137}Cs	$\sigma_0=0.11\pm 0.03\text{b}$ (Stupegia '60)	$\sigma_0=0.25\pm 0.02\text{b}$ $I_0=0.36\pm 0.07\text{b}$
^{90}Sr	$\sigma_0=0.8\pm 0.5\text{b}$ (Zeisel '66)	$\sigma_0=15.3\pm_{4.2}^{1.3}\text{mb}$ $I_0\leq 0.16\text{b}$
^{99}Tc	$\sigma_0=20\pm 2\text{b}$ $I_0=186\pm 16\text{b}$ (Lucas '77)	$\sigma_0=22.9\pm 1.3\text{b}$ $I_0=398\pm 38\text{b}$
^{129}I	$\sigma_0=27\pm 2\text{b}$ $I_0=36\pm 4\text{b}$ (Eastwood '58)	$\sigma_0=30.3\pm 1.2\text{b}$ $I_0=33.8\pm 1.4\text{b}$



(a) ^{16}O の仮定された光核反応断面積

(b) 60 cm厚の水 (H_2O) ターゲットを透過したガンマ線束分布のシミュレーション結果

(c) 上述透過ガンマ線束をHHSとGe検出器で観測した場合のガンマ線スペクトルのシミュレーション結果

図1 HHSによる透過ガンマ線束測定
のシミュレーション結果

—核分裂生成物の放射能を消滅させる— 大電力電子線形加速器の開発

大洗工学センター 先進技術開発室

担当役 江本 隆

1. 目的

核分裂生成物（F P）を加速器を用いて光核反応により消滅処理するための研究の一環として、電子線形加速器の大電力化を目的とした研究開発を進めている。このため、加速エネルギー10MeV、最大／平均ビーム電流100mA/20mAの大電力電子線形加速器を設計し、構成要素であるクライストロン、加速管等の試作、評価を実施した。ここでは、加速器を構成する電子銃、RFチョッパー、パンチャー、加速管、ビームダンプ、ビーム輸送系、モニター等の機器について設計方針、電子ビーム輸送のシミュレーションによる結果及び加速器製作の進捗状況を報告する。

2. 概要

将来の消滅処理システムではアンペア級の大電力加速器が必要と考えられる。これを一挙に実現することは技術的にも予算的にも困難であるため、当面、加速器の大電力化技術の開発に重点を置いて、エネルギー10MeV、最大／平均ビーム電流100mA/20mAを目標とした。図1に世界の代表的電子線形加速器をエネルギーと電流の関係で示す。本加速器はビームのエネルギーを高めるというこれまでの加速器開発の方向とは異なり、世界にも例のない大電力・大平均電流を目標とするものである。大電流化に当たっての基本的な技術課題は、従来の加速器と異なる電子銃の方式、ビーム発散防止対策、ビームローディング（加速管に供給する高周波とビーム電流の相互作用）による加速管温度の制御等があげられる。さらにこれらの課題は相互に関連しているため、ビームの安定性、加速管の熱除去、制御が重要な開発課題となる。

これらの開発課題に対し、設計研究を行うとともに、加速管、クライストロン等の主な構成要素について試作を行い、その性能試験を高エネルギー物理学研究所と共同で実施した⁽¹⁾。これらの試験結果を踏まえて、エミッタンスを劣化させないチョッパーなど新しい考案を含めて他に類のない大電力加速器（図2）を設計した。また、ビーム輸送シミュレーションによりエミッタンスを劣化させずにビームを通過できることを確認した。入射部は加速器の性能を決定する重要な部分であるため、加速器全体を一度に製作するのではなく、入射部を先行して製作し、この部分について性能試験を計画している。

現在、入射部試験に向けて機器の調整試験等を行っている。この結果を加速部の製作に反映させ平成8年度末に全体の据付・調整を完了する。その後、ビーム電流を徐々に上げて目標性能であるエネルギー10MeV、平均ビーム電流20mAを目指す試験を予定している。

⁽¹⁾ 遠山他、「大電流電子線形加速器の開発」動燃技報 No. 88 (1993)

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂 1-9-13 三会堂ビル

動力炉・核燃料開発事業団

核燃料サイクル技術開発部

フロンティア研究推進室

☎03-3586-3311