

平成11年度研究開発課題評価(事後評価)報告書

評価課題「分子レーザー法ウラン濃縮技術開発」

平成11年12月

核燃料サイクル開発機構
研究開発課題評価委員会
(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)

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
してください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 4 9
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 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)
1999

平成 11 年度研究開発課題評価（事後評価）報告書
評価課題「分子レーザー法ウラン濃縮技術開発」

核燃料サイクル開発機構
研究開発課題評価委員会
(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)

要 旨

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）は、内閣総理大臣が定めた「国の研究開発全般に共通する評価の実施方法の在り方についての大綱的指針」（平成 9 年 8 月 7 日決定）及びサイクル機構の「研究開発外部評価規程」（平成 10 年 10 月 1 日制定）等に基づき、研究開発課題「分子レーザー法ウラン濃縮技術開発」に関する事後評価を、研究開発課題評価委員会（高速炉・燃料サイクル課題評価委員会）に諮問した。

これを受けて、高速炉・燃料サイクル課題評価委員会は、本委員会によって定めた評価項目及び評価の視点に従い、サイクル機構から提出された評価用説明資料、補足説明資料及び委員会における議論に基づき、本課題の評価を行った。

本報告書は、その評価結果をサイクル機構の関係資料とともに取りまとめたものである。

目 次

1. 概要	1
2. 高速炉・燃料サイクル課題評価委員会の構成	1
3. 審議経過	2
4. 評価方法	5
5. 評価結果（答申書）	19

（参考）高速炉・燃料サイクル課題評価委員会 各委員の評価意見

参考資料（核燃料サイクル開発機構）

参考資料 1 研究開発課題の事後評価について（諮問）

参考資料 2 評価結果に対する措置

参考資料 3 分子レーザー法ウラン濃縮技術開発（課題説明資料）

参考資料 4 分子レーザー法ウラン濃縮技術開発（OHP資料）

参考資料 5 分子レーザー法ウラン濃縮技術開発 自己評価書

参考資料 6 課題評価委員の評価意見等に関する補足説明

参考資料 7 分子レーザー法ウラン濃縮の研究開発

－基礎研究から工学研究への発展－

（理化学研究所資料）

1. 概要

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）は、内閣総理大臣が定めた「国の研究開発全般に共通する評価の実施方法の在り方についての大綱的指針」（平成9年8月7日決定）及びサイクル機構の「研究開発外部評価規程」（平成10年10月1日制定）等に基づき、研究開発課題「分子レーザー法ウラン濃縮技術開発」に関する事後評価を、研究開発課題評価委員会（高速炉・燃料サイクル課題評価委員会）に諮問した。

これを受けて、高速炉・燃料サイクル課題評価委員会は、本委員会によって定めた評価項目及び評価の視点に従い、サイクル機構から提出された評価用説明資料、補足説明資料及び委員会における議論に基づき、本課題の評価を行った。

本報告書は、その評価結果をサイクル機構の関係資料とともに取りまとめたものである。

2. 高速炉・燃料サイクル課題評価委員会の構成

本委員会は、平成11年1月に設置され、関連分野の専門家を中心として、社会科学の専門家、ジャーナリスト、ユーザーなど、幅広い分野の委員から構成されている。

分子レーザー法ウラン濃縮技術は、旧動力炉・核燃料開発事業団と理化学研究所が分担して技術開発を行ったものである。このため、分子レーザー法全体としての観点も必要なことなどから、理化学研究所の本技術に関する課題評価委員を委員に加えて評価を行った。

委員長	岡 芳明	東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設教授
委員	井上 正	電力中央研究所原燃サイクル部長
	桑原 茂	関西電力(株)原子力・火力本部原子燃料部長
	近藤三津枝	ジャーナリスト
	清水 雅彦	慶應義塾大学経済学部教授・産業研究所所長
	鈴木 潤	未来工学研究所R & D戦略研究グループリーダー
	戸田 三朗	東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻教授
	中川 正幸	日本原子力研究所エネルギーシステム研究部長
	中村 雅美	日本経済新聞社編集委員
	モリス・ブレン	駐日欧州委員会一等参事官（科学技術担当）
	班目 春樹	東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設教授
	松井 恒雄	名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻教授
	松本 史朗	埼玉大学工学部応用化学学科教授
	若林 泰夫	東京電力(株)原子力研究所所長

（以下は本課題評価のために追加された委員）

	井澤 靖和	大阪大学レーザー核融合研究センター教授
	熊谷 幹郎	(財)産業創造研究所柏研究所長
	幸田清一郎	東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻教授
	山本 一良	名古屋大学大学院工学研究科原子核工学専攻教授

3. 審議経過

(1)第1回目の委員会開催（平成11年度第3回） 平成11年9月14日

- ・評価方法の決定
- ・課題内容の説明・検討

(2)第2回目の委員会開催（平成11年度第4回） 平成11年11月2日

- ・課題内容に関する補足説明、質問への回答
- ・評価結果の検討

(3)評価結果（答申書）のまとめ

第2回目の委員会における検討結果等により評価結果の修正を行い、各委員の了承を得て、評価結果(答申書)とした。

(4)答 申 平成11年11月29日

4. 評価方法

第1回目の委員会において、以下の評価作業手順、評価項目及び評価の視点を決定し、これらに基づき評価を行った。

(1)評価作業手順

原則として、以下の手順で評価を実施する。

1)第1回目の課題評価委員会開催（評価方法の決定、課題内容の把握・検討）

- ・評価方法を定める。
- ・被評価者から課題の説明を受け、内容を把握・検討する。
- ・なお、欠席した委員に対しては、別途、対応させる。

2)各委員の評価作業

- ・各委員は、第1回目の課題評価委員会開催後、評価用説明資料及び委員会における説明を基に、評価項目に従って評価を行い、評価意見及び質問を書面で事務局に提出する。
- ・事務局は、これらを整理して、次回の課題評価委員会の検討資料を作成する。

3)第2回目の課題評価委員会開催（課題の評価）

- ・必要に応じて被評価者より補足説明を受けた後、各委員が行った評価、並びにサイクル機構の評価用説明資料、補足説明資料及び委員会における議論に基づき、課題評価委員会としての評価を行う。

4)評価結果（答申書）のまとめ及び答申

- ・委員長は、委員会の審議結果に基づき、事務局の補佐を得て委員会としての評価結果をまとめ、理事長に答申する。
- ・答申書には、次項に示す各評価項目及び総合評価について、委員会としての評価結果を記述する。
- ・上記と異なる意見がある場合には、答申書にその意見を併記する。

5)その他

評価をよりの確なものとし、また評価に対する被評価者の理解を深めるため、上記の委員会には研究実施責任者及び担当者を出席させ、議論に参加させるものとする。

(2)評価項目

評価項目は次のとおりとする。(○は評価の視点)

また、研究開発を進めていく上での提言、留意点があれば、コメントする。

1)研究開発課題の目的・意義

- 目的・意義は明確かつ的確であったか。
- 社会的・経済的ニーズはあったか。
- 国内外の関連技術動向が的確に把握されていたか。

2)研究開発目標の設定

- 目標の設定は適切であったか。
- 状況に応じて適切に見直しが行われたか。
- 国内外の関連技術動向を的確に把握、反映したものであったか。

3)研究開発計画

- 計画内容(小課題の設定・内容、年次計画等)は具体的で妥当なものであったか。
- 状況に応じて計画の見直しが適切に行われたか。

4)研究開発体制

- 実施体制(組織、人員等)、他機関との協力・連携、運営は妥当なものであったか。
- 設備・機器は適当であったか。

5)研究開発成果

①成果の内容について

- 達成された具体的な成果について、水準、質、意義等の評価
- 計画と比較した達成度(要因分析等を含む)
- 費用対効果のバランスが取れているか。

②実用化との関係について

- 実用技術開発に寄与するものであったか。
- 実用化への技術的見通し
- 実用化のために必要な技術開発課題は何か。

③成果の普及、公開について

- 成果発表、特許出願・取得の実績
- 波及効果

6)総合評価

○上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断

○今後の新たな課題の遂行において反映されるべき事項の提言・示唆を含む。

5. 評価結果（答申書）

平成11年11月29日

核燃料サイクル開発機構
理事長 都甲 泰正 殿

研究開発課題評価委員会
(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)
委員長 岡 芳明 

研究開発課題の評価結果について（答申）

当委員会に諮問[11 サイクル機構（経企）030]のあった下記の研究開発課題の事後評価について、その評価結果を別紙のとおり答申します。

記

研究開発課題「分子レーザー法ウラン濃縮技術開発」

以上

事後評価課題「分子レーザー法ウラン濃縮技術開発」
高速炉・燃料サイクル課題評価委員会 評価結果の概要

分子レーザー法ウラン濃縮（以下、分子法）は、濃縮ウランの安定供給や核燃料サイクル全体の自主性を確保するため、経済性を考慮しつつ国内におけるウラン濃縮の事業化を進めていく、というウラン濃縮に関するわが国の基本方針の下で、経済性向上の可能性がある新技術として、理化学研究所（以下、理研）と旧動力炉・核燃料開発事業団（以下、旧動燃）が分担して技術開発を行ったものである。

旧動燃における技術開発は、理研の原理実証研究結果を工学規模により実証することを目的とした第1期、及び工学試験により技術的可能性を見極めることを目的とした第2期の研究開発から構成され、昭和63年から平成10年まで行われた。

本プロジェクトは適切な目的、目標のもとに開始され、極めてインパクトのある研究開発を行い、基礎的研究から工学的開発フェーズへの橋渡しとなる数々の成果が得られており、「技術の可能性を見極める」という所期の目標は概ね達成したものと評価できる。また、限られた予算と人員の中で優れた成果を上げ、分子法の実用化のために必要な研究課題を明らかにしたこと、将来の実用化開発研究に向けての技術基盤を築き上げたことは高く評価される。

なお、経済性の評価は、本来、工学規模の装置を用いた実証試験を経て、安定的な実用技術としての見通しが立った段階で試みるべきものであり、本プロジェクトの成果は未だその段階には達しておらず、時期尚早である。

本プロジェクトにおいては、理研と旧動燃が課題を分担し、協力しながら開発を進めるという、これまでにない体制で研究が行われた。協力関係は概ね有効に機能したと言える。

残された大きな課題としては、分離スキームをさらに最適化して、実用化を見通せる水準まで技術を高めることと、大幅なコストダウンを達成できるレーザー技術の開発が挙げられる。

一方、分子法は、遠心分離法や原子レーザー法との比較において、技術開発の成熟度から、現時点で事業化の候補とすることは困難である。また、今後わが国としてはスクラップアンドビルドにより原子力開発におけるより重要な課題に重点的に取り組むべきこと、本プロジェクトの中からこのまま開発を続ければコスト面で既存技術を凌ぐことを保証し得るブレイクスルーが得られなかったことから、プロジェクトとしては一度区切りをつけるべきである。

ただし、レーザー技術の進展が将来的に革命的なコスト低減をもたらす可能性があること、分子レーザー法同位体分離技術は新しい同位体制御材料の創成など将来のブレイクスルーを生み出す可能性のある重要な基盤技術であることなどから、サイクル機構、あるいは他の研究機関において、基礎研究を継続することが望まれる。

事後評価課題「分子レーザー法ウラン濃縮技術開発」

高速炉・燃料サイクル課題評価委員会の評価結果

分子レーザー法ウラン濃縮（以下、分子法）は、濃縮ウランの安定供給や核燃料サイクル全体の自主性を確保するため、経済性を考慮しつつ国内におけるウラン濃縮の事業化を進めていく、というウラン濃縮に関するわが国の基本方針の下で、経済性向上の可能性がある新技術として、理化学研究所（以下、理研）と旧動力炉・核燃料開発事業団（以下、旧動燃）が分担して技術開発を行ったものである。

旧動燃における技術開発は、理研の原理実証研究結果を工学規模により実証することを目的とした第1期、及び工学試験により技術的可能性を見極めることを目的とした第2期の研究開発から構成され、昭和63年から平成10年まで行われた。

高速炉・燃料サイクル課題評価委員会においては、上記の旧動燃が行った研究開発を対象に、本委員会によって定めた評価項目及び評価の視点に従い、核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）から提出された評価用説明資料、補足説明資料及び委員会における議論に基づき、評価を行った。

【総合評価】

本プロジェクトは適切な目的、目標のもとに開始され、極めてインパクトのある研究・技術開発を行い、基礎的研究から工学的開発フェーズへの橋渡しとなる数々の成果が得られており、「技術の可能性を見極める」という所期の目標は概ね達成したものと評価できる。また、限られた予算と人員の中で優れた成果を上げ、分子法の実用化に必要な研究課題を明らかにしたこと、将来の実用化開発研究に向けての技術基盤を築き上げたことは高く評価される。本技術開発が、未踏領域の技術開発であることや、機微技術であるため外部からの情報が得られず完全な自己開発であったこと、さらには計画の最後の約2年間に本計画以外の不幸な要因により試験研究を進めることができなかったことを考えると、その成果に対してより高い評価を与えることができる。

なお、経済性の評価は、本来、工学規模の装置を用いた実証試験を経て、安定的な実用技術としての見通しが立った段階で試みるべきものであり、本プロジェクトの成果は未だその段階には達しておらず、時期尚早である。

本プロジェクトにおいては、理研と旧動燃が課題を分担し、協力しながら技術開発を進めるという、これまでにない体制で研究が行われた。協力関係は概ね有効に機能したと言える。

第2期研究開発では、超音速ノズルやレーザーなどの要素技術開発で着実な進展が

見られ、実用化に必要なデータが蓄積された。また、基礎実験では約 10%の濃縮が可能であるという、予想を上回る大きな成果が得られた。

研究開発の最終段階における研究の中断により、分離スキームに関する基礎データの蓄積や濃縮試験が充分に行われなかったことは誠に残念である。濃縮試験では目標値の達成に至っていないが、研究開発を次の段階に進めるためのデータベースは一応の水準に達していると言える。

残された今後の大きな課題としては、分離スキームをさらに最適化して、実用化を見通せるある一定の水準（5%の濃縮）まで技術を高めることと、大幅なコストダウンを達成できるレーザー技術の開発、濃縮製品捕集技術などが挙げられる。分離スキームの最適化については、照射波長の数を増やすことにより、実用化目標となる濃縮度 3～5%、原料の 10%以上を製品として分離できる条件を確立することが一番の課題である。分離スキームやレーザーについての新しい提案を基礎実験により評価するとともに、これまでに得られたデータベースを基に（目標値の見直しを含めて）要素技術開発の目標値を明確にして開発を進めることが重要であろう。また、近年、レーザーの技術革新は目覚しく、これまでとは原理を異にする新しいタイプのレーザー（例えば、パラメトリック変換を利用した全固体レーザー）の出現も予想され、将来、本技術の実用化の可能性がより高くなることも考えられる。これらについての検討も必要であろう。

一方、分子法は、遠心分離法や原子レーザー法（以下、原子法）との比較において、技術開発の成熟度から、現時点で事業化の候補とすることは困難である。また、今後わが国としてはスクラップアンドビルドにより原子力開発におけるより重要な課題に重点的に取り組むべきこと、本プロジェクトの中からこのまま開発を続ければコスト面で既存技術を凌ぐことを保証し得るブレークスルーが得られなかったことから、プロジェクトとしては一度区切りをつけるべきである。

ただし、赤外多光子解離を利用する分子法レーザー同位体分離技術はウラン以外の多くの元素に適用が可能であり、新しい同位体制御材料の創成など将来のブレークスルーを生み出す可能性のある重要な基盤技術である。この意味においても、本プロジェクトの終了により、これまで積み上げられてきた成果が四散してしまうことや、分子法の研究者がいなくなってしまうことは問題である。また、これまでの研究開発により課題が明白になったことや、レーザー技術の進展が将来的に革命的なコスト低減をもたらす可能性があることなどを考慮すると、これまで開発されたレーザー設備等機器の有効利用という観点からも、サイクル機構、あるいは他の研究機関において、基礎研究を継続することが望ましい。

今後、基礎研究を行うにあたっては、海外の動向調査を継続して実施するとともに、遠心分離法や原子法、あるいは海外のウラン濃縮役務コスト予測との比較の下、分子法が経済的に競争力を持ちうる条件を見極めていくことが必要であろう。また、ブレークスルーを加速するには、本プロジェクトで得られた成果をできるだけ公開し、知的財産として共有することが重要である。機微技術としての制約はあるもののできるだけ公開を希望する。

なお、第2期計画については、目標値の設定に飛躍が大きすぎたのではないかと、理研のブレークスルー研究との連携がやや不明確ではなかったかと、との指摘もあった。

また、ウラン濃縮という機微な情報を含む研究の評価であるので、説明資料の目的にも最終結果の記述にも具体的な数字がほとんど現れていない。具体的な数字を出さずに到達度を記述することは困難なことだとは思いますが、定量的な評価作業が反映された記述であることが望ましい、との意見もあった。

本課題を含む今後の基礎研究、基盤研究のあり方について、次のことを指摘しておきたい。

- ・ サイクル機構で基礎研究を実施するのであれば、機構の全経費の数％は基礎研究に回し、その部分についてはサイクル機構に属する研究者の自主的判断で研究を行えるようにすべきである。

他機関で実施するのであれば、原子力の基礎研究のあり方について大学を含めて見直しを行い、全体を適切な形で調整しつつ、資金が大学等にも回るような体制を作るべきである。

- ・ 動燃改革検討委員会報告書に示されている「レベル0」（原理的可能性が発見されているが、実用化の可能性は不明なもの）の研究は、サイクル機構では実施できないことになっているので、サイクル機構の業務を遂行する上でこの「レベル0」の研究の必要性が生じた場合には、他機関でその研究が実施できるようなシステムを作るべきである。

但し、プロジェクトの基礎を支える基盤研究については、サイクル機構でそれを実施できることが望ましい。目的を特定しない基礎研究については、学問の横断的側面も考慮すると、大学等にまかせてそれとの連携を図るのがよいのではないかと。

- ・ 米国エネルギー省では、大型加速器の予算の1％をそのマネジメントとは別にし、大学等の研究者に使わせ、加速器の技術革新を図ろうとしている。これには技

術革新により将来の加速器とその予算の巨大化を防ぎたいとの意図もある。これは研究機関の研究者も応募できる。このシステムは、今後の日本で技術革新を図る上で非常に参考になる。

【各評価項目に対する評価意見】

(1) 研究開発の目的・意義

本研究開発は、原子力長期計画及び原子力委員会ウラン濃縮懇談会の報告書に基づき、国のプロジェクトとして実施されたものである。

わが国は、必要とする濃縮ウランの大部分を輸入に頼っている。ウラン濃縮の事業化は、核燃料サイクルの自主性を確保し、濃縮ウランの一層の安定供給を実現することによりわが国のエネルギーセキュリティを高めることを目的としており、大きな意義がある。このため、わが国は遠心分離法を実用化したが、価格競争力が十分ではなく、国際競争力のある濃縮技術の開発が課題であった。分子法は、現在世界で実用化されている遠心分離法やガス拡散法に比べ、飛躍的に分離効率を改善できる可能性があり、ウラン濃縮役務の国際競争力を高めるとともに、濃縮役務コスト及び原子力発電コストを低減する可能性がある。その意味で本プロジェクトの目的・意義は明確であり、これはプロジェクトがスタートした昭和 63 年当時も今も変わりはない。また、国際競争力のある濃縮工場を保有できれば、ウラン濃縮役務市場におけるバーゲニングパワーとしても意義がある。

研究開発開始当時は欧米等が原子法、分子法の研究開発を積極的に展開しており、わが国の将来の国際競争力向上のために本研究を進めることは意義があった。

また、代替（競合）濃縮技術開発を行うことは、既存の遠心分離法の改良と経済性向上を加速させる上でも重要と考えられる。さらに、濃縮技術は同位元素の特性研究と利用技術開発を行うための中心技術であり、開発による波及効果が科学技術分野のブレークスルーや産業の高度化をもたらす可能性もあった。

以上の観点から、研究開発の目的・意義は明確かつ的確であり、社会的・経済的ニーズにあったものと判断される。

現在は軍事用ウランの大量供給ということもあり、今すぐ効率的な濃縮技術が必要であるという状況ではないが、将来的にはいつでも自主技術で燃料サイクルが確立できるという状況への対応は必要である。

今後ウラン濃縮技術を開発して行く場合には、現在の遠心分離法をより効率化し経済性を追求した方が良いのか、原子法が良いのか、分子法なのかを技術的可能性、実現性、経済性、核拡散抵抗性など種々の観点から評価して進める必要がある。また、世界の政治・経済情勢の変化から見ると社会的・経済的ニーズに関しては変化してきていると思われる。諸外国のほとんどが何故、原子法、分子法を止めたかも詳しく分

析し、それも踏まえわが国独自の判断で、今後の研究開発をどうするかを考える必要がある。

関連技術動向については、機微技術であるというハンディの中で、国内外の動向が的確に把握されていた。しかし、レーザー技術やノズル設計に関して、この研究と独立に何処かで有用な技術開発があり得るのかなどの、周辺の一般的な研究動向の把握が十分であったか否かは判然としない。どの程度一般周辺技術の進展を取り入れられるかの判断も重要ではなかったか。

(2) 研究開発目標の設定

実用化段階に必要とされる技術・性能を念頭において、超音速ノズルと分離スキームを最適化して分離性能向上の可能性を見極めることと、処理量の観点から実用化に必要な高出力 kHz 級レーザーシステムの技術的見通しを得るとの目標が設定されている。これらの目標は、ウラン濃縮懇談会報告書に示されている「技術の可能性を見極める」という研究開発目標にかなうものとなっている。

第1期の研究では、理研の工学基礎試験で 3.7%の濃縮が実現されており、第2期の濃縮試験における捕集製品濃度 3%以上という開発目標値は、レーザー開発及び実用プラント設計の目標値とともに、当時としては、妥当なものであったと評価できる。昭和 63 年に本プロジェクトを開始する時点では原理的なもの以外ほとんど分かっていた状況において、10年で数%濃縮の実証を目指そうという目論見は十分に野心的なものであった。

レーザーは、分子法の成立性に大きく影響するキーポイントであり、繰り返し周波数の飛躍的な増大が必要である。従って、1 kHz 程度で安定に発振する炭酸ガスレーザーシステムと、1 kHz 程度のラマンレーザーの開発という目標が掲げられた点は、妥当であった。

また、一定濃縮度の技術的確保と分離・回収効率の向上という技術的にはトレード・オフの関係にある要素技術に関して、目標を固定せず柔軟に対応したと推測される点についても評価される。

研究成果や関連事業の整理縮小にともなう予算状況の変化も反映して、適宜目標の見直しが行われてきたこと、機微技術という限界がある中で良く国内外の関連技術動向の把握、反映に努めてきたことは、評価できる。また、理研の成果を適宜取り入れたことや、開発の発展段階に応じて最もネックとなっている部分の開発に集中したことなど、機動性も良かった。

一方、以下の点については多少問題があったのではないかと指摘があった。

- ・分子法が基礎的な研究開発フェーズであることを考慮すれば、「濃縮度」のみを数値目標としたことは理解できる。但し、本来は原理確認のための小スケールでの目標と、ある程度のスケールで工学試験を行う上での目標を分離し、後者は回収率と濃縮度の双方に妥当な目標を設定すべきであった。
- ・機微情報のため他の濃縮法の技術情報を一定レベル以上入手できない状況下で、実用プラントに関するプラント設計研究の設定、特に経済性評価は時期尚早であった。技術的内容の吟味を十分できる状況になってから経済性評価を行うべきで、「技術の可能性を見極める」から経済性評価までのステップに飛躍が大きすぎたと言わざるを得ない。
- ・最終目標をブレークダウンしたサブの目標を立て、結果をきめ細かく評価する必要があったのではないか。

(3) 研究開発計画

分離性能の向上に必要な要素技術の実用化への課題を摘出して、具体的に解決していく研究計画、レーザー開発においても十分な設計研究のもとに要素技術の開発試験を行う研究計画は、概ね妥当なものであったと評価できる。

なお、平成9年度の予期せぬ施設停止により、工学試験による実際的なウラン濃縮特性の把握が十分できずじまいに終わってしまったことや、kHz ラマンレーザーの実証が出来なかったのは、残念である。研究中断がなければ、もう一段の研究計画の推進が可能であったと思われる。また、平成8年度より予算が急減しているが、本研究開発のように明確な目標を持つプロジェクトを計画に沿って推進するための方策としては、疑問の残る取り扱いである。

関連研究機関との情報交換により、状況に応じた計画の見直しもなされている。

一方、研究計画、進め方等に関して、次の指摘があった。

- ・最終製品捕集技術が開発計画の中に含まれていないが、これは分離スキームの最適化と密接に関係していると考えられることから、検討すべきではなかったか。
- ・工学試験は、超音速ノズルの最適化と分離スキームの最適化という形で進められているが、3.5%濃縮の達成条件が見出されていない時期に、最適化研究を行うのは理解しにくい。実際に行われていた研究は、最適化ではなく、ノズル形状の開発と分離スキームの開発ではなかったのか。
- ・第1期研究開発目標の未達成部分(原理的に約5%の濃縮が可能であることの確認)

の達成を第２期に持ち越しており、そのために割いた時間・組織も多いと思われる。本来は第１期の分離基礎実験でこの原理的可能性を確認し、その際に摘出された問題点を踏まえて第２期研究開発計画を策定すべきであった。従って期間、人員、組織の面から見て、本研究開発計画項目は、欲張りすぎたものと考えられ、また、状況に応じた開発計画の適切な見直しは十分ではなかった。その意味でプラント設計研究と応用研究の計画は不必要ではなかったか。

- ・国内外の開発・技術レベルの状況と目標達成の難易度を考えると、中間段階で評価を行い、計画の見直しを行うことも必要ではなかったか。

（４）研究開発体制

本研究開発の大きな特徴の一つは、理研とサイクル機構が研究協力協定を結び、理研がブレークスルーを目指した基礎科学技術分野を、サイクル機構が実用化技術開発を分担し、緊密な協力の下で研究開発が進められた点にある。本研究開発にはレーザー開発や基礎的な現象解明に基づいたプロセス構築が必要であり、理研をはじめとするこの種の研究能力の高い機関との密接な協力が不可欠である。第１期、第２期ともこの体制は、概して、有効に機能してきたと言える。

また、分子レーザー法ウラン濃縮技術委員会により指導助言を得ているとともに、機器開発とエンジニアリングについては国内の企業の協力を受け、さらに、理論解析、先端測定技術、応用研究等については、大学との研究協力を行っている。大学及び研究機関における教育と人材育成も適切になされている。これらのことから研究開発体制は適切であったと考える。

理研との研究協力協定のもとに人事交流、設備の相互利用を実施している点、大学等の協力を積極的に受け入れている点、メーカーの技術蓄積を利用している点など、研究開発体制は、今後他のプロジェクト等で見本とすべきものがあり、高く評価できる。

旧動燃の実施体制(組織、人員等)も適切であった。

第１期において開発された機器を中心とする第２期の研究開発設備・機器による研究開発は順当に進められたと認められる。レーザー系、分離系共に実用化を念頭に置いた設計となっており、また、適宜工夫と改良を繰り返しており、設備・機器は適切であったと認められる。

一方、研究体制、人員に関して、次の指摘があった。

- ・第２期の目標・計画が技術の可能性を見極める上での工学試験を行うことにある点

を鑑みると、原子法プロジェクトのような研究組合を作る方式又は1組織にすべての研究実施を委ねた方が、責任体制も明確になり効率的ではなかったか。

- ・旧動燃内部の研究体制については、研究開発の目標及び項目の多様性からみて、専門分野別研究従事者数（人員数）が十分に確保されていなかったのではないか。

（５）研究開発成果

1) 成果の内容について

計画と比較すると、実用化の枢要技術についてはその目標を達成したと考えられる。なかでもガス冷却温度と到達濃縮度の相関関係の解明や、励起2波長では濃縮度2～3%が限界であること、また、製品微粒子の直径が予想より小さく革新的な捕集方法の開発が新たに必要であることが分かったという成果などをもっとアピールしても良いのではないか。工学試験における分離性能については最大濃縮度2%と目標の3%に達していないが、原理的には10%の濃縮が可能であることを示している。

さらに、kHz レーザーの開発研究は実用化を目指したキー開発研究として十分な成果をあげており、高繰り返しを必要とする実用技術の可能性を明らかにしている。本研究開発の成果は、原子法との比較評価が可能なレベルのものではないが、技術的可能性を見極めるという観点からいえば、プロジェクトの期間・条件・制約の下で、十分かつ有用な成果をあげたプロジェクトであると評価される。

一方、実用化までにはかなりのハードルも存在しており、本研究が一区切りであるならば、現段階が実用化までのどの位置にあるかを明確にしておくことと、どこまでのことが分かって、どんな課題が残されているのか、それを達成するためには技術的側面だけでなく、どの程度の規模の研究資源を必要とするのか、などを明らかにしておくことが必要である。

①超音速ノズル開発

超音速ノズルの最適化については、赤外半導体レーザーを用いた分光測定、シュリーレンによる流れの可視化技術を用いてノズルの流動特性評価技術を確立したことは高く評価される。

②分離スキーム研究

分離基礎試験で約10%の濃縮が可能であることを示したことは、世界をリードする極めて大きな成果であると評価できる。

ただし、新しく提案されている4波長照射で目標とする分離係数が得られることを基礎実験で実証しておく必要があったのではないか。

③ウラン濃縮試験

開発したノズルを用いた3波長照射による濃縮実験では、目標とする分離係数を達成するには至っていない。

工学条件下では最大濃縮度は2%の達成に留まったが、原理的には約10%の濃縮が可能であることを確認し、この差を克服するために必要な課題の究明をかなり行えたことは将来につながる成果である。

④レーザー開発

パルス炭酸ガスレーザーについては、高繰り返し動作のための要素技術開発を実施して、繰り返し1kHz、パルスエネルギー約3Jを達成し、その製作の見通しを得て当初の目標を概ね達成している。1kHz ラマンレーザーについては2段階ラマンセル方式を考案し、解析コードを用いてその有効性を確認しているが、試験機の製作と性能確認は行われていない。光学材料に関しては目標値が達成された。これらの成果は高く評価される。

⑤プラント設計研究など

商業プラントの概念設計を行い、経済性を評価しているが、分子法の経済性を客観的に評価できるほどの事例ではなく、分離プロセス、レーザーについてのより詳細な最適化を実施し、精度を高める必要がある。

現段階では、暫定的にせよ無理にコスト評価を試みることは適切ではない。総合評価で述べているように、本研究開発の成果は未だ経済性評価を試みる段階には至っていない。

また、次の指摘もあった。

- ・「技術の可能性を見極める」との目標についての成果に対しては、分離特性測定試験装置レベルでは達成されていると判断できるが、ウラン濃縮試験における実際のウランの濃縮特性においては、当初の目標は達成できていないと言わざるをえない。実際の物としての分離回収についての検討が不十分なためと思われる。したがって、分子法の工学システムの観点から見れば、「技術の可能性を見極める」との目標は達成されたとはいえない。ただし、個々の要素技術の研究開発の成果のレベルは高く、次への研究開発ステップへつながる十分な成果は得られている。
- ・ウラン濃縮試験においては、2%の濃縮度にとどまったのは目標を下回っている。分離スキームとして実質的にはあとどの程度の向上の可能性があるのかが、現時点での工学試験の結果から定量的に推測することは必ずしも出来ない。原理面では十分の成

果を上げているが、この意味で工学試験での研究が遅れた。これは予期せぬ施設中断の影響もあったものと推定する。

2) 実用化との関係について

実用技術開発という観点からは、経済性、達成可能濃縮度、効率などが重要であるが、かなりの部分は見通せる段階まで研究開発が進んだといえる。しかし、今後要求される濃縮度が5%を越えることを想定すると、実用化が可能という結論を得るには一層の技術開発が必要であろう。

技術的可能性を完全に見極めるまでには多くの課題はあるものの、実用化への技術的見通しをつけるための課題を摘出した点で多くの成果をあげている。

超音速ノズル、並びにレーザーの要素技術については開発目標値が達成され、実用化に近い段階にまで開発が進んだと評価できる。ただし、ノズルについては、新たに提案された4波長照射によって必要な濃縮特性を実現できるかどうかを基礎実験などにより確認し、さらに性能向上を図るかどうかを判断する必要がある。レーザーについては、これまでに得られたデータを基にして、プラントを設計する上で最も経済性に優れたレーザーのユニットシステム(500Hz x 20式、100Hz x 100式など)を検討する必要があるように思われる。濃縮製品捕集技術は今後の課題である。

炭酸ガスレーザーに関して、連続発振型のパルス化により高繰り返しを得るという新しいアイデアが提案されている。これは、分子法のためのレーザーとして、ブレイクスルーをもたらす可能性がある。ただし、パルス幅は従来のレーザーに比べて一桁程度長くなると予想されるので、レーザーのパルス幅が分離係数に及ぼす影響を基礎実験により評価しておく必要があるだろう。

実用化のための基盤技術としてさらに研究開発を継続すべき課題としては、多波長化を含めた分離スキームの最適化やkHz レーザーシステムの連続運転性能の評価がある。さらに、濃縮役務コストの低減のためには、10kHz 以上の高繰り返し高出力炭酸ガスレーザーの開発を挙げることができる。なお、レーザー技術はめざましい発展を遂げつつあるので、幅広い視点からの見直しを行うことも有益であろう。

3) 成果の普及、公開について

濃縮技術という機微情報管理が求められるなかで、積極的に成果の公開が行われていると認められる。

ただ、公開論文数など十分とは言えない。科学的成果として公開できるものはできる

だけ発表するなど、関係者の更なる努力を期待したい。

また、ノズルの解析や設計技術（低圧流体の可視化技術、流動解析技術等）、レーザーの高繰り返し化技術などは一般性のある技術であり、これらを含め、機微情報に触れない波及技術については、成果の詳細な公開、普及を進めることが望ましい。

ウラン濃縮技術は、いわゆる機微情報であり、一般的な技術情報と区別しなければならない。特許制度は、社会的にみて機微性をもたない経済財のうち、通常の市場取引によってはその生産費用（コスト）はもとより利潤の確保が困難な財に適用される制度である。本研究開発の成果に基づく技術情報は、技術の社会的性格からみて、その開発費用を市場取引によって回収すべき性格のものではない。したがって、特許出願に際しても、特定の開発成果に限定される。このように考えると、本研究開発の成果に関する特許出願・取得の実績は、機微性を保持した範囲内で、適切かつ妥当なものと評価される。

わが国には欧米のような秘密特許の制度がないことが特許化を妨げているとの指摘があった。この点は、世界的な知的所有権保護重視の流れに加えて、研究者のインセンティブにも大きく関わるものであり、国の特許制度の見直しが望まれる。

【総合評価】

「技術の可能性を見極める」という初期の目標に対して満足する成果が得られている。機微技術であるため外部からの情報が得られず完全な自己開発であったことや計画の最後の約2年間に本計画以外の要因により実験を進めることができなかったことを考えるとその成果に対してより高い評価を与えることができる。

近年の半導体レーザーの技術革新は目覚ましいものがあり、将来、本技術の実用化可能性がより高くなることも考えられる。レーザー同位体分離技術は同位体機能性材料など将来のブレークスルーを生む重要な基盤技術であることから分離技術については適当な他の研究機関に技術に移転する等、何らかの形で研究開発を継続することが望ましいと考えられる。

目的を限定的に捉え、様々な想定に基づく実用化プラントの経済評価を除けば、本研究開発は、目標の設定・開発計画・開発成果等、総合的にみて妥当なものと評価される。

未踏領域としての分子法の位置付けから見て、本プロジェクトは基礎的研究から工学的開発フェーズへの橋渡しとなる数々の成果を上げたと評価できる。原子法や遠心法とのフェーズの違いから、分子法が現時点での事業化の候補とはなり得ないことは明らかであるが、スケールアップのための問題点が明確になった点や、半導体レーザー技術の進展が将来的に革命的なコスト低減をもたらす可能性が指摘されている点などを考慮すると、小スケールでの要素技術開発を中心に、(サイクル機構以外が担当となっても)研究開発が継続されるべきである。

ただし、要素技術の開発と並行して、進歩した遠心法や原子法、海外のウラン濃縮役務のコスト予測と比較の下で、分子法が経済的に競争力を持ち得る条件(半導体レーザーのコスト)を見極めていくことが必要であろう。

第一期においては、理想的な形で開発研究は進められているが、目標数値の濃縮度を実証するに至らなかったことを踏まえて、第二期の計画が長期的視野も含めて立てられ実施された。成果は総じて分子レーザー法の実用を支持するものと判断される結果となっているが、不幸な要因によって第2期の最終部分の試験研究が阻害されたこと、また実用化への可能性を残した段階で研究開発が中止になったことは大変残念である。しかし、将来の実用化開発研究への基盤を築き上げられたことは高く評価される。

極めてインパクトのある研究、技術開発を行い初期目標を完全には達成できなかったがかなりの到達度に達したことは評価できる。研究開発が予期しない事由により中止になったことは、研究者には残念なことであったと思うがそれを評価にも考慮する必要がある。

本プロジェクトは適切な目的、目標のもとに開始され、所期の成果は一応達成したものと評価する。しかしながら、今後国としては原子力開発におけるより重要な課題に重点的に取り組むべきこと、プロジェクトの中からこのまま開発を続ければ必ずコスト面で既存技術に打ち勝つことを保証するようなブレークスルーが出てこなかったことから、プロジェクトとしては一度区切りをつけるべきであると考えます。

なお、プロジェクトの終了により、これまで積み上げられてきた成果が四散してしまうこと、今後分子レーザー法濃縮については国内には研究者が全くいなくなってしまうことは問題である。プロジェクトとして継続すべきとは考えないが、基礎研究は何らかの形で継続すべきである。そのための基礎研究の受け皿をサイクル機構自身または他機関で用意することが可能となるように強く要望する。サイクル機構で実施するなら、全経費の数％は基礎研究に回し、その部分についてはサイクル機構に属する研究者の自主的判断で研究を継続できるような体制を作るべきである。他機関で実施するなら、原子力の基礎研究のありかたについて大学を含めて見直しを行い、全体を適切な形で調整しつつ資金が大学等にも回るような体制を作るべきである。いずれにしても我が国の原子力開発のありかたの根幹に関わる大きな問題であり、分子レーザー法ウラン濃縮技術開発の評価の一部として議論できるような問題ではないが、今後我が国の技術開発はスクラップアンドビルドが今まで以上に頻繁になることを考えるとここでも指摘せざるをえない問題である。

本プロジェクトの技術の可能性を見極めるという研究開発目標に対して一定の成果を得ているものと高く評価したい。

本研究に関連した諸外国の技術開発動向、さらには他の濃縮技術である遠心分離法、分子レーザー法との技術的（経済的）問題点等の正確な把握が困難である為、他の手法との技術的および経済的な比較の上での評価ではない旨の記述が必要と考える。

目標設定の所で述べているように経済性評価は時期尚早であり、原子法の報告書が技術評価報告書とある様に、本プロジェクトの評価報告書では経済性評価の項を削除した方がよいと考える。

機微技術であるため定性的でも良いが、自己評価報告書のp.6の9-11行目に若干肉付けして今後実用化に向けての技術的課題を追加する必要がある。

サイクル機構としての分子法の実用化技術開発を現時点で中断するのは止むを得ないものとする。しかしながら将来の技術開発の再スタートに備えるとともに、本プロジェク

トで培ってきたレーザー技術は原子力のみならず他分野への波及効果が大きいことも鑑み、レーザー除染技術等の環境保全技術開発も含めてレーザー設備を、共同利用施設として活用することは重要である。

目標の設定に飛躍が大きすぎた。経済性評価には無理があったと思われる。「技術の可能性を見極める」についても、必ずしも充分の成果が得られたとは言い難い。

しかし、理論的検討に困難なところがあったこと等止むを得ないところがあったことを鑑みれば、技術の可能性の見通しは充分得られていると判断できる。

なお、困難な課題に対して外部の研究機関の協力を仰いで、解決していく努力が必要であったと思われる。

限られた予算と人員の中で優れた成果を上げている。不測の運転停止で十分な実験回数を取れなかったものの、分子法技術開発の歴史の中で第一ステップを良く完了している。

本研究開発では、理研とサイクル機構が課題を分担し、協力しながら開発を進めるという、これまでにない体制で研究が実施された。協力関係は（一部を除いて）有効に機能したと言える。

第二期では、超音速ノズルやレーザーなどの要素技術開発で着実な進展が見られ、成果が蓄積された。また、基礎実験では約 10%の濃縮が可能であるという、予想を上回る大きな成果が得られた。

研究開発の最終段階で実質的には 2 年に近い研究の中断があり、分離スキームに関する基礎データの蓄積や濃縮試験が充分に行われなかったことは誠に残念である。濃縮試験では目標値の達成に至っていないが、研究開発を次の段階に進めるためのデータベースは一応の水準に達していると言える。

次の段階は実用化のための実証であると考えられるが、分離スキームやレーザーについての新しい提案を基礎実験により評価すること、これまでに得られたデータベースを下にして（目標値の見直しを含めて）要素技術の開発目標値を明確にすることが重要であろう。レーザー技術の進歩は著しく、これまでとは原理を異にする新しいレーザー（例えば、パラメトリック変換を利用した全固体レーザー）の出現も考えられる。これらについての検討も必要であろう。

多光子解離を利用する分子法レーザー同位体分離技術は、ウラン以外の多くの元素に適用が可能で、新しい同位体制御材料の創成にブレークスルーをもたらす基盤技術であると考えられている。これまで開発された機器の有効利用も含めて、上記のような基盤技術を

どのように推進するかを考慮することも重要である。

分子レーザー法技術の実用化のために必要な研究課題が本研究によって明らかとなった。まだいくつかのブレークスルーが必要である。これを加速するには本研究で得られた成果をできるだけ公開し、知的財産として共有することが重要と思われる。ウラン濃縮に関する研究は秘密にされがちであるが、実用プラントの設計に関わらない部分はできるだけ公開されることを希望する。

自己評価書ではば妥当と考える。

ウラン濃縮という機微な情報を含む研究の評価なので、目的にも最終結果の記述にも具体的な数字がほとんど現れていない。

したがって、目標がどの程度達成されたかを判断することは、かなり困難だと言わざるを得ないと思う。開示は不要だとは思いますが、内部的に具体的な数字を挙げた定量的な評価作業が行なわれているのか。その結果が反映された内部評価書であれば、その記述が尊重されるべきであると考えます。

しかし、内部評価書を一読した限りでは、それらの記述では解釈に大きな幅を許しており、必ずしも具体的な数字に基づく評価を行なわなくても書く事が出来そうな気もする。ほとんどの項目で当初の目標が達成されたとあるが、これだけ困難なプロジェクトで、ほとんどの目標が完全にクリアできるとは、担当者の献身的な努力を勘案しても、考えにくいことである。具体的な数字を出さずに到達度を記述することは困難なことだとは思いますが、定量的な評価作業が反映された記述であることが望まれると考える。

【各評価項目に対する評価意見】

(1) 研究開発の目的・意義

ウラン濃縮技術を開発し、濃縮ウランの一層の安定供給を実現することにより我が国のエネルギーセキュリティを高めるという研究開発の目的と意義は明確かつ的確であった。濃縮技術は同位元素の特性研究と利用技術開発を行うための中心技術であり、開発による波及効果が科学技術分野のブルークスルーや産業の高度化をもたらす可能性もあった。

研究開発開始当時は欧米等が原子レーザー法、分子レーザー法の研究開発を積極的に展開しており、我が国の将来の国際競争力の向上のため濃縮技術開発を進めることは社会的、経済的ニーズがあった。国内外の関連技術動向も的確に把握されていた。

燃料サイクルの自主性確保という観点からの、目的・意義は明確であると思う。現在は軍事用ウランの大量供給ということもあり、今すぐ効率的な濃縮技術が必要であるという状況ではないが、将来的にはいつでも自主技術で燃料サイクルが確立できるという状況への対応は必要であると考ええる。

開発初期は原子法、レーザー法などの革新技术の可能性を追求するという目的は明確であるが、今後ウラン濃縮に使う技術としての開発をして行く場合には、現在の遠心法をより効率化し経済性を追求した方が良いのか、原子法が良いのか、分子法なのかを技術的可能性、実現性、経済性、核拡散抵抗性など種々の観点から評価して進める必要があると考える。

国内外の関連情報に付いては判断できるような報告(資料)が会議で公表されなかったもので特に意見は出せない。しかし諸外国ほとんどが何故止めたかを詳しく分析して、それも踏まえ我が国独自の判断で今後の研究をどうするか考える必要がある。

国内濃縮技術の選択肢が遠心分離法、原子レーザー法、分子レーザー法とある中で技術的、経済的見通しのたっていなかった分子レーザー法に国が取り組んだことは意義のあることであった。

研究開発当事者の説明によれば、ウラン濃縮技術の原理は、いわゆる「原子法」と「分子法」に二分され、特に本研究開発では、後者「分子法」の原理実証研究とその成果に関する工学規模の実証研究が目的とされている。これは、研究開発を担当した旧動力炉・核燃料開発事業団の目的であるが、その背後にはウラン濃縮懇談会の検討結果を受けて決定された原子力委員会の指針あるいは目的がある。両者に基本的な齟齬はない。しかし、具

体的な内容についていえば、原子力委員会の目的は、分子法によるウラン濃縮技術の実証研究を超えている。つまり、「原子法」との比較評価が可能なレベルの研究成果を目的としているのである。ここでいう、比較評価とは、二つの原理に基づく二つのウラン濃縮実証技術に関して、ほぼ同等の濃縮度をもつウランを分離・回収する際、濃縮ウラン産出単位当たりでみた消費エネルギー効率およびコストの比較を指している。

事後評価という観点からいえることは、旧動力炉・核燃料開発事業団が担当した「分子レーザー法ウラン濃縮技術開発」の成果は、「原子法」との比較評価が可能なレベルのものではなく、「分子法」の原理に基づく実証技術の可能性（フィージビリティ）に関する研究の成果である、という点である。すなわち、事後的に評価すれば、研究成果からみて当初設定された目的が過大あるいは過剰であった、と考えられる。ただし、このことは、本研究開発の成果が十分ではないことを意味するものではない。目的を「分子法」実証技術の技術的可能性に限定すれば、十分かつ有用な成果が得られたものと評価される。

原子力委員会やウラン濃縮懇談会において、明確に目的・意義が述べられており、特に問題はないと考える。

分子レーザー法ウラン濃縮技術の開発研究が、我が国のエネルギーセキュリティとそれを高める潜在技術として、昭和 62 年の原子力長期計画に基づき開始されたが、第一期における理化学研究所の原理実証研究結果を工学的規模により実証する試験、平成 5 年からの技術の「可能性を見極める」第二期の研究開発研究ともに、その目的と意義は明確かつ的確であり、国内外の動向も的確に把握して進められている。

本研究課題は原子力長計並びにウラン濃縮懇談会の報告の下に国のプロジェクトとして実施されたものであり目的・意義は明確にされていた。遠心分離法に勝る新濃縮技術の開発はエネルギー源の確保、原子力発電のコスト低減の観点から社会的、経済的な意義は存在していたと考える。

本プロジェクトは、ガス拡散法や遠心分離法に比べ飛躍的に分離効率を改善できる可能性のある分子レーザー法ウラン濃縮技術について、科学的・技術的な実証を目的としたものである。我が国は現在、必要とする濃縮ウランの大部分を輸入に頼っている。近未来においては遠心分離法による国産化を目指しているが、コスト面に問題があることが指摘されている。その意味で本プロジェクトの目的・意義は明確であり、これはプロジェクトがスタートした昭和 63 年当時も今も変わりはない。

エネルギー資源の乏しい我が国において、エネルギーセキュリティの観点から濃縮技術を独自に持つことは必要である。また、遠心法1種類に限定せず、代替（競合）濃縮技術開発を行うことは、既存の遠心法の技術開発（改良）と経済性向上をも加速させる上で重要と考えられる。

本濃縮技術はレーザーを用いた方法であり、他の科学技術分野に及ぼす波及効果は大きい。

以上の観点から本技術開発の目的・意義は明確で、国の状況に合ったものであると考える。

ウラン濃縮はガス拡散法及び遠心分離法ですでに事業化されているが、濃縮役務コストの低減はウラン濃縮の国際競争力を保っていくうえでの基本的課題である。レーザ法は濃縮役務コストをかなり引き下げられる可能性のある濃縮法であることから、ウラン濃縮を行っている各国で積極的に研究開発が進められてきた。最近になって、研究開発を中止したりして、一時ほどの研究開発の勢いはなくなっているのが現状であるが、それにはそれなりの理由が存在する。また、ウラン濃縮技術は核拡散の問題から機密事項技術であり、独自の研究開発に頼らなければならない技術である。一方で、ウラン濃縮役務コスト市場におけるバーゲニングパワーとして、ある程度の規模の国際競争力のある濃縮工場を保持しておくことは必要なことである。

したがって、研究開発の目的・意義は明確かつ的確であり、社会的・経済的ニーズにあったものと判断される。しかし、世界の政治・経済情勢の変化から見ると社会的・経済的ニーズに関しては変化してきていると思われるので、研究開発の再検討が必要となってきたと言える。

開始当初原子力長計でも謳われていた、「核燃料サイクルの自立」に直接寄与するものであり、研究開発の目的・意義は明確かつ的確であったといえる。

社会的・経済的ニーズについても明確であったといえる。但し、経済性については概ねありそうなものの、開発の進展と共に明らかにしていこうという面もあった。

国内外の関連技術動向の把握については、機微技術であるというハンディの中で良く把握していたと評価できる。

自己評価書通り。（2件）

次世代の有力なウラン濃縮法の一つとして分子レーザー法ウラン濃縮技術を開発すると言う目的・意義は十分あった。

ウランの市場未来予測、他の競合技術（特に遠心分離法）の将来予測が出発点でどの程度、可能だったか、あるいは詳細に行われていたかが、社会的・経済的ニーズに対する検討が十分であったかを知る上で重要であろう。

国内外の関連技術のうち、ウランのレーザー濃縮に関する研究動向は可能な限り行われていたものと考えられる。むしろ、レーザー技術の一般的な動向、例えば、この研究と独立に何処かで有用な技術開発があり得るのかなどの、周辺の研究動向の把握が十分であったか否かは判然としない。ノズル設計に関しても同様である。即ち、どの程度周辺で独立にある技術の進展を取りいれられるかの判断も重要ではなかったか。

（２）研究開発目標の設定

超音速ノズルと分離スキームを最適化して分離性能向上の可能性を見極めることと、処理量の観点から実用化に必要な高出力 KW 級レーザーシステムの技術的見通しを得るとの目標が設定されている。技術の可能性を見極めるとの目標にかなう研究開発目標となっている。研究開始後の状況の変化に応じて見直しも適切になされている。

目標設定、計画内容はおおむね妥当と考える。

（１）項に関連して目的を限定的に捉えたと、本研究開発における目標設定は適切であったと評価できる。特に、一定濃縮度の技術的確保と分離・回収効率の向上という技術的にはトレード・オフの関係にある要素技術に関して、目標を固定せず柔軟に対応したと推測される点である。これは、ウラン濃縮技術およびその関連技術が機微情報であり、国内外の関連技術動向が的確に把握できない状況にあることと考え合わせれば、むしろ高く評価される。

説明を聞いた限りでは、目標の設定方法に多少問題があったように感じる。具体的には、「濃縮度」のみを数値目標とし、回収率を目標の中に取り入れなかった点である。これは、ウラン濃縮懇談会報告書の「原理的に約 5 % の濃縮が可能であることを確認する」や、「その可能性を見極めるために今後も開発を継続し」などの表現が基になっているものと考えられるが、動燃事業団としては原理確認のための小スケールでの目標と、ある程度のスケールで工学試験を行う上での目標を分離し、後者は回収率と濃縮度のセットで妥当な目標を設定するべきだったのではないか。

ただし、分子法が基礎的な研究開発フェーズであることを考慮すると、このような数値目標をおくことそのものが妥当であったのかどうかも疑問が残る（目標数値の達成度が研

究者や研究グループの評価とリンクしていたとするならば、研究者にとってはあまりモチベーションがあがらない状況であったことが想像される)。

第一期の研究開発結果を受け、さらに平成6年の長計改定での「2000年における次段階への判断」に対応して、第二期の目標を長期的展望の中で設定したのは適切である。実証を目指す濃縮値の設定と、必要なレーザー開発および実用プラント設計研究を明確に目標に掲げている。

概ね妥当であった。しかし、1kHzの新しいレーザーの開発の必要性は理解できるが、これを重要な開発目標としたのは、これまでの旧動燃の研究、技術分野から考えると必ずしも妥当とは思えない。当時は理研を初めレーザー開発により適した機関はなかったのかとの疑問が残る。

実用化段階に必要とされる技術・性能を念頭において、要素技術である超音速ノズルとレーザーシステムの研究開発目標が設定されており、これらは妥当なものであったと評価する。また、実用化プラントの概念設計等も並行して実施されており、その成果や関連事業の整理縮小にともなう予算状況の変化も反映して適宜目標の見直しが行われてきたことも評価に値する。平成6年の原子力長期計画では「研究開発を次の段階に進めるべきか否かを平成12年頃までに判断する」となっており、現時点がまさにこの判断を実施する時期にある。

原子力委員会ウラン濃縮懇談会での報告書にある「技術の可能性を見極める為の研究・技術開発」であり、設定された目標は妥当である。

しかしながら、本方法は、情報開示規制のある機微技術情報を多く含み、他の遠心法や原子レーザー法等の濃縮法の技術情報を一定レベル以上入手できない状況下で、実用プラントに関するプラント設計研究（特に経済性評価）の設定は時期尚早であったと考えられる。

研究開発の初期での理化学研究所における原理実証の成果を基に「技術の可能性を見極める」目標については適切であったと思われるが、実用化プラントの概念設計程度までは良しとしても、経済性評価を目標としたことについては欲張りすぎていたと言わざるをえない。ウラン濃縮技術は最先端技術の集積であるが、すぐに実用化へと簡単にはいきにくい技術である。技術的内容の吟味を十分できる状況になってから経済性評価を行う方がよいと思われる。「技術の可能性を見極める」から経済性評価までのステップに飛躍が大きす

ぎたと言わざるをえない。

なお、「技術の可能性を見極める」目標において濃縮度に重点がおかれていて、量的な観点が疎かにされていたと思わらざるをえない結果となっている。

昭和63年に当プロジェクトを開始する時点では原理的な物以外殆ど分かっていなかった。それを10年で数%濃縮の実証を目指そうという目論見は十分に野心的であった。

理研の成果を適宜取り入れる、開発の発展段階に応じて最もネックとなっている部分の開発に集中するなど、機動性は良かった。

機微技術という限界がある中で良く国内外の関連技術動向の把握、反映に努めてきており、評価できる。

第一期の研究では、理研の工学基礎試験で3.7%の濃縮が実現されており、第二期の濃縮試験における捕集製品濃度3%以上という開発目標値は、レーザー開発およびプラント設計の目標値とともに、当時としては、妥当なものであったと評価できる。

工学試験の、「一段の濃縮により、濃縮度3%以上の製品UF₆の分離及び捕集ができることを実証する」との目標は、技術の成立性を評価するための最終目標と思われる。レーザー濃縮法は、分離チャンバー周辺に限っても種々の要素技術の組み合わせで成立していることを考えると、この最終目標をブレイクダウンしたサブの目標を立て、結果をきめ細かく評価する必要はなかったか。「さらなる多波長化等も含めた分離スキームの検討が必要」との結論が得られているが、もう少し早くこの結論が得られなかったのか、という感じがする。

レーザーは、分子法の成立性に大きく影響するキーポイントであり、繰り返し周波数の飛躍的な増大が必要である。従って、1kHz程度で安定に発振する炭酸ガスレーザーシステムと、1kHz程度のラマンレーザーの開発という目標が掲げられた点は、妥当であったと思われる。

開発目標設定は妥当であったと考える。施設中断の間にどの程度の目標の変更が行われたかは判然としない。

(3) 研究開発計画

分離性能の向上、レーザー開発とも適切な計画内容となっている。関連研究機関との情報交換により状況に応じた計画の見直しもなされている。

妥当と考える。

(2) 項の目標設定と同様に、(1) 項の目的を限定すれば、本研究開発の計画は、小課題の設定・内容およびタイム・スケジュールのいずれも具体的で妥当なものである。

理化学研究所との緊密な協力の下で研究開発が進められたことが窺え、その面からは高く評価できる。他方、原子法グループとの連携や半導体レーザー関連の研究者との連携とその成果の取り込み（概念検討レベル）、遠心法の進歩を見越した当計画の再考、等が有ったのか無かったのかが不明確である。もし無かったのだとすれば、これらも随時行われるべきではなかったか。

第二期の目標を、3 %達成できなかった第一期の結果を分析し、工学試験における主要要素の超音速ノズルと分離スキームの最適化におき、さらに実用化へのキーとなるレーザーの開発においたことは、適切であり、小課題による研究開発の進行計画も適切である。

工学試験の内、超音速ノズルの最適化計画は妥当である。分離スキームの最適化のために行った分離基礎試験は、理論予測の困難な過程を最適化するという点では重要なステップであるが、理研が分担すべき部分との重複はなかったのか。

国内外の開発、技術レベル状況を考えると低コストでの実用化という観点からは、達成の難易度を考えると中間段階で評価を行い、見直しを行うことも必要ではなかったか。レーザー開発に関しては、上記2つに関連した疑問が残る。

研究開発計画自体は妥当なものであったと評価する。

本プロジェクトには、第1期研究開発目標の未達成部分（5 %以上の濃縮度の達成を原理的に確かめる分離基礎試験の実施）を第2期の本プロジェクトに持ち越しているものと思われる。この未達成部分を第Ⅱ期に達成してはいるもののその為にさいた時間・組織が多いものと考えられる。また、旧動燃時代のアスファルト固化処理施設の火災事故による試験施設使用停止が長期に渡ったことも重なり非常に限られた期間での研究開発であった。本来は分離基礎実施でこの原理的可能性を事前に実施し、その際に摘出された問題点を踏まえて第Ⅱ期研究開発計画を策定すべきであった。従って期間、人員、組織（理研も含めて）の面から見て、本研究開発計画項目は、欲張りすぎたものと考えられる。分子レーザー法濃縮技術委員会での評価・助言は技術的な面に限られ、国策という点で計画の見直しは難しい面もあったと考えられるが、状況に応じた開発計画の適切な見直しは十分では

なかった。その意味でプラント設計研究と応用研究の計画は不必要であった。

分離性能の向上に必要な要素技術の実用化への課題を摘出して、具体的に解決していく研究計画、レーザ開発においても十分な設計研究のもとに要素技術の開発試験を行う研究計画は概ね妥当と判断できる。

なお、分離スキームの最適化において、分離特性測定試験装置を中心に行わざるをえなかったために、工学試験装置を用いてのウラン濃縮試験における実的なウランの濃縮特性の状況が十分把握できずじまいに終わってしまったことは残念である。

一方、製品としての粒子回収についての技術開発についての計画があまり見えてなかったようである。当初はあまり問題となるとは思っていなかったようであるが、これは分離スキームの最適化と密接に関係していると考えられることから、粒子回収の観点からの検討が必要ではなかったかと思われる。この点から見ると状況に応じて計画の見直しが適切に行われたかに疑問が残る。

概ね妥当であったと判断できる。

最終製品捕集技術が開発計画の中に含まれていないが、分離基礎試験、要素技術開発とも計画策定段階においては妥当なものであったと評価できる。ただ、濃縮試験における低い分離係数が、どの程度計画の見直しに反映されたかの疑問は残る。また、平成8年度より予算が急減しているが、本開発研究のように明確な目標を持つプロジェクトを計画に沿って推進するための方策としては疑問の残る取り扱いである。

工学試験は、超音速ノズルの最適化と分離スキームの最適化という形で進められてるが、3.5%濃縮の達成条件が見出されていない時期に、最適化研究を行うのは理解しにくく感じた。何らかの形で3.5%を達成した後に、条件の最適化に進むのが普通。最適化という言い方は避けた方が良くはないか。説明を見ると、実際に行われていた研究は、ノズル形状の開発、分離スキームの開発であり、最適化ではないように思われる。

実用化時に必要とされる数十kHz級パルスレーザの開発は、説明で述べているとおり、著しく困難と思われる。不可能と断定してしまうと、分子法開発の芽が無くなってしまうとすると、開発への戦略が必要と思われが、はっきりとは述べられていないように見える。他のレーザの可能性等を検討する必要は無かったのか。

平成9年度における予期せぬ施設中断はまことに残念であった。この間の研究があれば、もう一段の研究計画の推進が可能であったと期待される。

理研のブレークスルー研究の成果が、どの程度工学試験に活かされたか。ブレークスルー研究と工学研究が、当初、相互にどのように関係すべきと考えられていたかが不明確である。相互の時間的なマッチングが最適だったかは疑問が残る。例えば、理研での添加ガスの効果の結果などが工学試験に活かされることが望ましかった。

kHz ラマンレーザーの実証が出来なかったのは残念である。

(4) 研究開発体制

理化学研究所と研究協力協定を結ぶとともに分子レーザーウラン濃縮技術委員会により指導助言を得ている。機器開発とエンジニアリングについては国内の企業の協力を受けている。大学研究機関における教育と人材育成も適切になされている。これらより研究開発体制は適切であったと考える。

理研との役割分担を図った開発、メーカー等における技術蓄積などをうまく考えた体制と考える。

動燃事業団が理化学研究所、メーカー、大学等と協力、協調体制をとって研究開発を進めたことは効率的な研究開発が可能になる点から評価できる。

本研究開発担当者の説明による限り、理研をはじめとする他機関との協力・連携は妥当なものであったと思われるが、旧動力炉・核燃料開発事業団内部の研究体制については、研究開発の目標および項目の多様性からみて、専門分野別研究従事者数（人員数）が十分に確保されていなかったのではないかとと思われる。

旧動燃事業団による研究開発の実施体制(組織、人員等)、理化学研究所との協力体制、さらに大学との研究協力、開発における国内メーカーとの協力、いずれも適切に実施されており、また第一期において開発された機器を中心とする第二期の研究開発設備・機器による研究開発は順当に進められたと認められる。

産官学の協力の下に行われ、概ね妥当である。本研究にはレーザー開発や基礎的な現象解明に元づいたプロセス構築が必要であり、理研をはじめとするこの種の研究能力の高い機関との密接な協力が不可欠である。これは分子レーザー法ウラン濃縮技術委員会の指導の下に的確に行われたと思える。

理化学研究所との研究協力協定のもとに人事交流、設備の相互利用を実施している点、大学等の協力を積極的に受け入れている点など、研究開発体制は今後他のプロジェクト等で見本とすべきものがあり、高く評価できる。

理研と協力して本プロジェクトを実施する体制にはなっているものの、本プロジェクトの第Ⅱ期の研究開発目標・計画が技術の可能性を見極める上での工学試験を行うことにある点を鑑みると原子法プロジェクトの様な研究組合を作る方式または1組織にすべての研究実施を委ねた方が責任体制も明確になり効率的と考えられた。理研が本プロジェクトで担ったブレークスルー研究の中味と旧動燃計画へのフィードバックが不明確である。この点についても、研究開発計画の所で述べたことと同様にⅠ期の計画を引きずった形でⅡ期がスタートしており、基礎研究（理研）が工学的濃縮技術開発の中に入り込んでおり不自然な気がする。

設備・機器・人員等は適切である。

研究開発体制は基本的には問題はなかったと思える。ただ、赤外多光子吸収過程が複雑のため理論計算によって正確に予測することが困難であったことや分離回収粒子の特性評価が難しかったこととか幾つかの研究開発上の検討すべき課題があったと思われる。そのようなときに適切な研究機関の協力を仰げる柔軟性が必要ではなかったかと思える。

少数精鋭（20人台）で研究体制を組んでおり、適切な実施体制である。

先導的なブレークスルー的基礎研究は理研に任せ自らは開発研究に専念しており、また、先生や専門家からなる技術委員会に適宜指導を受けており、他機関との協力・連携も妥当なものと認める。

レーザー側、風洞側共に実用化を念頭に置いた設計となっており、また、適宜工夫と改良を繰り返しており、設備・機器は適切であったと認める。

本研究開発の大きな特徴の一つは、理研が基礎科学技術分野を、サイクル機構が実用化技術開発を分担し、協力しながら開発を進めてきた点にある。第一期、第二期ともこの体制は、概して、有効に機能してきたと言える。ただ、第二期の最終段階において、4波長照射という新しい分離プロセスがサイクル機構から提案されているが、これは理研の基礎研究における分離プロセスとは異なる新しい提案であり、両者の情報交流が完全ではなかったのではないかとの印象を持つ。

自己評価書の通り。

研究の経緯から考えて妥当であったと判断される。

理化学研究所との良好な連携協力について、特記すべきであると思う。

(5) 研究開発成果

①成果の内容について

超音速ノズルの最適化については赤外半導体レーザーを用いた分光測定、シュリーレンによる流れの可視化技術を用いてノズルの流動特性評価技術を確立したことは高く評価される。

パルス炭酸ガスレーザーについては繰り返し 1 KHz、パルスエネルギー約 3 J を達成し、その製作の見通しを得て当初の目標を達成している。1 KHz ラマンレーザーについては 2 段階ラマンセル方式を考案し、解析コードを用いてその有効性を確認し、当初の目標を達成している。これらの成果は高く評価される。

計画と比較すると、実用化の枢要技術についてはその目標を達成したと考えられる。工学試験における分離性能については最大濃縮度 2 % と目標 3 % に達していないが、原理的には 10 % の濃縮が可能であることを示している。計画の最後の約 2 年間に於いて本計画以外の要因により実験の実施が困難であったことを考えるとこの成果は満足すべきものと考えられる。

貴重な成果が多く得られていると考える。

5 % 濃縮の技術的、経済的見通しを得たことは評価できる。

本研究開発の成果に関する事後評価については、(1) 項の評価項目「研究開発の目的・意義」に関連して述べたので、省略する。ただし、「プラント設計研究」の成果とされているコスト評価例（「研究開発課題事後評価説明資料 3」の 88 頁）は、「分子レーザー法」の経済性を客観的に評価できるほどの事例ではない。(1) 項の「研究開発の目的・意義」に、「分子法」に基づく濃縮技術の経済性評価が含まれていることから、暫定的にせよ無理にコスト評価を試みることは適切ではない。本来、経済性評価は、工学規模の装置を用いた実証試験を経て、安定的な実用技術が確立された後に試みるべきであり、本研究開発の成果は未だその段階にはない。

質量分析計レベルでは当初目標を上回る 10 % の濃縮率を達成しながら、工学試験のメ

インであるスケールアップした施設で当初目標の3%を達成できなかったということは、形の上ではプロジェクトは失敗であったと見なされるかもしれない。しかし、説明を聴く限り、そもそも分子法は原子法と比べても研究開発の初期段階にあり、この段階で成功／失敗を軽々に判断すべきではないと考える（この意味からも研究開発目標の設定が問題となる）。むしろ、ガス冷却温度と到達濃縮度の相関関係の解明や、2波長では濃縮度2～3%が限界であること、また、製品微粒子の直径が予想より小さく革新的な捕集方法の開発が新たに必要であることが判った、という成果などをもっとアピールしても良いのではないか。

主要機器の開発における実用化への基盤となる成果をあげており高く評価される。分離スキームの最適化研究により約2%の濃縮度を達成できたことは、直ちに実用化へということではないが、可能性を大きく示した成果である。さらにkHzレーザの開発研究は実用化を目指したキー開発研究として十分な成果をあげており、さらに高繰り返しを必要とする実用技術の可能性を明らかにできている。プロジェクトの期間と限られ開発機器の制約の中で実用化への可能性を示しえた成果をあげたことに、敬意を表したい。

超音速ノズルの開発では、実用化に必要な中核技術を確認したことは大きな成果である。工学条件下では最大濃縮度は2%の達成に留まったが、原理的には約10%の濃縮が可能であることを確認し、この差を克服するために必要な課題の究明をかなり行えたことは将来につながる成果である。

個々の技術については有意義な成果をあげたと評価する。しかしながら部分的には最大濃縮度3%を達成できなかったことなど、十分でないところもある。これ自体は技術開発にリスクはつきものであり、問題とするべきではない。最大の問題は、コスト面で既存技術を凌駕することを示すようなブレイクスルーがなされなかったことにある。プロジェクトの実施によって分子レーザ法ウラン濃縮技術実用化までの道筋が明らかとなり、課題も明確化された。結果として、このまま開発を続けても既存技術にコスト面で打ち勝つとは保証できないことが明らかとなった。成果としては十分であるが、さらにプロジェクトとして続けるべきとは言いがたい。

研究開発目標の設定および開発計画の所で述べた期間・条件・制約の下で、総合的には十分な成果をあげたプロジェクトである。

「技術の可能性を見極める」との目標についての成果に対しては、分離特性測定試験装

置レベルでは達成されていると判断できるが、ウラン濃縮試験における実際的なウランの濃縮特性においては当初の目標はクリアできていないと言わざるを得ない。実際の物としての分離回収についての検討が不十分なためと思われる。したがって、分子レーザ法ウラン濃縮の工学システムの観点から見れば、「技術の可能性を見極める」との目標は達成されたとは言い難い。

とりあえず2%の濃縮度を達成している。このレベルは産業界のニーズに十分な物ではないが進歩である。ただ、取得量からチャンピオンデータの嫌いがある点が惜しまれる。開発のためにレーザの設計技術、超音速ノズルの設計技術共に良く習熟しており、今回の成果は水準、質共に評価できるものと認める。

最終フェーズの平成9、10年度に於いて、当プロジェクトに責を負わせることの出来ないやむを得ない理由により、計画通りに開発が進められなかったことが惜しまれる。さもなくば、より多量の濃縮ウランを取り出して技術成果をより確実なものに出来たであろう。

装置産業的な色彩の強いプロジェクトでありながら、約10年の開発期間に於いて出来るだけ自ら開発を実施するなどして、費用の低減に努めてきた跡が伺える。

超音速ノズルの流動特性評価技術を開発し、開発目標値を達成した。ただし、開発したノズルを用いたウラン濃縮試験では、当初計画の3波長照射で目標とする濃縮度は達成されておらず、冷却温度などの開発目標値の設定、あるいは研究計画の見直しに、やや甘さがあった可能性がある。

分離基礎試験で約10%の濃縮が可能であることを示したことは、世界をリードする極めて大きな成果であると評価できる。ただ、基礎試験のより重要な目的は、照射波長やレーザ光のフルエンスなどをパラメータとして、反応率や分離係数に対する比例則を確立し、濃縮試験条件に対する指針を与えることであると考えられる。濃縮試験条件の検討に必要な基礎データがどれだけ蓄積できたか、また、目標とする分離係数を3波長照射で達成できるノズルパラメータが実用的なプラントで実現できるか、などについては、第一回目の報告では明らかにされていない。さらに、新しく提案されている4波長照射で目標とする分離係数が得られることを基礎実験で実証していない点も不満である。研究開発体制のところでも述べたが、分離スキームの検討は、基本的に、理研の守備範囲であり、理研との協力体制、研究計画の見直しなどの点で、やや問題があったのではないかとの印象を受けた。

開発したノズルを用いた3波長照射によるウラン濃縮実験では目標とする分離係数を達成するに至っていない。

炭酸ガスレーザーについては高繰り返し動作のための要素技術開発を実施し、概ね目標値を達成した。ラマンレーザーについては新たに2段階ラマンセル方式を提案し、その有効性を解析により示しているが、試験機の製作と性能確認は行われていない。光学材料に関しては目標値が達成された。

商業プラントの概念設計を行い、経済性を評価しているが、分離プロセス、レーザーについてのより詳細な最適化を実施し、精度を高める必要がある。

どの項目についても、当初期待していた以上の成果が得られていると思う。アスファルト固化施設の事故というアクシデントの余波で、最後の大事な試験が未完に終わってしまったことは全く残念である。

成果の内容について、ウラン濃縮試験においては、2%の濃縮度にとどまったのは目標を下回っている。分離スキームとして実質的にはあとどの程度の向上の可能性があるのか、現時点での工学試験の結果から定量的に推測することは必ずしも出来ない。原理面では十分な成果を上げているが、この意味で実施面での研究が遅れた。これは予期せぬ施設中断の影響もあったものと推定する。

超音速ノズルに関しては、大きな成果を挙げられたと拝察する。しかし、凝縮することなく十分な数密度を維持して、目標とした極低温まで到達しているのか。もうこれ以上の研究開発は必要としないのか。より大きな密度、より低温は必要ないのか。このあたりをもう少し追加してもらいたいと思う。

分離スキームの最適化という言葉は、部外者から見ればイメージをつかみにくいところがあります。超音速ノズル開発とも関連するが、ノズルでなし得なかったところを、スキームの方に押し付けているところはないのか。超音速ノズルが改善されれば、スキームも変わるのか。このあたりをもう少し追加してもらいたいと思う。

②実用化との関係について

実用化との関係においては分子レーザー法は技術的にその可能性があることを確認できたと考える。枢要技術である超音速ノズルとパルス炭酸ガスレーザーについては、ほぼ実用化の段階に到達している。

実用化のための基盤技術としてさらに研究開発を継続すべき課題としては多波長化を含めた分離スキームの最適化や KHz レーザーシステムの連続運転性能の評価がある。さらに濃縮役務コストの低減のためには10 KHz 以上の高繰り返し、高出力炭酸ガスレーザー

の開発をあげることができる。

実用化までにはかなりのハードルも存在しているように思う。本研究が一区切り(あるステップを超えた段階)であるならば、現段階が実用化までにどの位置にあるかを明確にしておくことと、どこまでのことが分かって後にどんな課題が残されていて、それを達成するためには技術的側面だけでなく、人、物、金的にもどんな規模となるかを残しておくことが必要と考える。

実用化のためには、さらに分離スキームの最適化やレーザーの開発といった要素技術の開発が必要。またこれらを踏まえて実証試験が必要になると思われる。レーザーについては他分野でのレーザー開発の成果が将来利用可能になるかもしれない。

国内で採用する濃縮技術の現時点での優先順位は技術の成熟度の順番から遠心分離法、原子レーザー法、分子レーザー法とすることが適当であり、分子レーザー法については今後、国が研究開発を続けるかあるいは現時点で中断して適切な機関にこれまでの成果を保有・維持してもらうことが妥当と考える。

米国 DOE は本年 7 月に AVLIS の開発を断念したもののオーストラリアで SILEX の研究開発を引き続き行うとしており、動向調査を続けることが重要と考える。

実用技術とはいかなる要件を満たした技術を指すかにもよるが、本研究開発の成果が、実用技術開発に大きく寄与するものであり、実用化への技術的見通しについても一定の成果が得られていると評価される。ただし、1,500 t SWU/y の実用化プラントの経済性評価については、先に述べたように、いまだ実施する段階にはないと思われる。むしろ、今後の課題とするのが適切である。

本研究開発により実証できた濃縮技術、およびその試験研究のため開発された機器、さらに実用化のためのレーザー開発の成果等を総合して、実用技術としての寄与を十分に果たしていると評価される。また分子レーザー法の実用への可能性を示しえた認められるが、第二期の開発試験が不幸な要因によって十分な成果を得るに至らずに終結せざるを得なかったため、実用化に必要ななお困難な開発課題の指摘に止まったことは、大変残念なことである。

実用技術開発という観点からは、経済性、達成可能濃縮度、効率などが重要であるがかなりの部分は見通せる段階まで研究開発が進んだといえる。しかし、今後要求される濃縮度も 5 % を越えることを想定すると(高燃焼度化のため)、実用化が可能という結論を得る

には一層の技術開発が必要であろう。

実用化のためには、大型レーザーの開発、分離スキームの一層の高効率化、カット率の向上などの課題がある。装置の小型化もコストダウンのためには必要であろう。なお、レーザー技術はめざましい発展を遂げつつあるので、幅広い視点からの見直しを行うことも有益であろう。

分子レーザー法ウラン濃縮技術の実用化を考えると、二つの点が問題となる。第一はウラン濃縮事業に関わる環境条件の変化である。現在の原子力開発において重要な課題は他にも数多くあり、その中ではウラン濃縮技術開発は緊急度はそれほど高くないといわざるをえない。したがって開発コストがさらに掛かるのであれば、技術自体としては有望でも国として優先的に開発投資をすることはできない。第二は技術の達成度である。今後の開発にはこれまで以上に巨額な投資を必要とする。それでいながら、既存技術にコスト面で打ち勝つという保証はまだ得られていない。すなわち実用化にはリスクが伴うことを指摘せざるをえない。もちろん可能性のある技術であることは否定できない。民間が開発リスクを負担し継続するのはもっとも望ましいことである。

本研究成果は実用化技術開発に寄与するものであり、技術的可能性を完全に見極めるまでには多くの課題はあるものの、実用化への技術的見通しをつける為の課題を抽出した点で多くの成果をあげている。

実用化に向けた研究開発を行う第Ⅲ期研究開発の為には、1組織に人員・設備を集中して、原子法のような電気事業者の参加も含めた体制が必要であろう。

個々の要素技術の研究開発の成果のレベルは高く、次への研究開発ステップへつながる十分な成果は得られていると思う。当面は研究開発がストップとのことであるので、得られた成果の整理に基づく今後の課題とそれへの取組方等を記録としてきちんと整理して残しておいて欲しい。

開発は実用化へのキーポイントであるレーザー技術と超音速ノズル技術に特に重点を置いてなされている。実用化はまだ先であるものの、その方向は間違っていなかったと評価できる。

まだパイロットプラントの段階であり、実用化への見通しを語るにはやや時期尚早である。研究設備の不測の運転停止がなければ実用化の現実性についてもっと議論できたであろう。分子法は、設備の定期停止無く連続運転が可能であるという良い面も持っており、実用化できれば優れた技術といえる。

研究実施者は必要な技術課題を良く認識している。

超音速ノズル、ならびにレーザーの要素技術については開発目標値が達成され、実用化に近い段階にまで開発が進んだと評価できる。ただし、ノズルについては、新たに提案された4波長照射によって必要な濃縮特性を実現できるかどうかを基礎実験などにより確認し、さらに性能向上を図る必要があるかどうかを判断する必要がある。

レーザーについては、繰り返し1kHzのレーザーを10式並列運転して必要な繰り返し周波数を実現するとの前提で開発が進められたが、これまでに得られたデータを下にして、プラントを設計する上で最も経済性に優れたレーザーのユニットシステム(500Hz×20式、100Hz×100式など)を検討する必要があるように思われる。濃縮製品捕集技術は今後の課題である。

炭酸ガスレーザーに関して連続発振型のパルス化により高繰り返しを得るという新しいアイデアが提案されている。分子法のためのレーザーとしてブレイクスルーをもたらす可能性がある。ただし、パルス幅は従来のレーザーに比べて一桁程度長くなると予想されるので、レーザーのパルス幅が分離係数に及ぼす影響を基礎実験により評価しておく必要があるだろう。

実用化との関係について、実用化の価値と可能性は十分にあるとの成果を示しているが、まだその定量的な判断は十全には出来ない。周辺技術の動向(例えば、半導体レーザー技術の動向等)を見極めながらさらに検討することが望ましい。

プラント設計研究に関しては、コスト算定の際の前提の確度を追記すべきであると考ええる。将来技術のコスト評価の結果は、おうおうにして一人歩きをして、さまざまな判断を誤らせる結果をもたらす恐れがあり。この分子法の評価に際しては、このようなことが起こらない様にしたいと考える。

③成果の普及、公開について

成果の普及と公開については濃縮技術という機微情報管理が求められるなかで積極的に成果の公開が行われている。波及効果については低圧流体の可視化技術、流動解析技術などがある。

派生技術としてどんな分野での応用が可能か、そのためのハードルは高いのか、比較的容易なのかも考えられる範囲で記述しておくことが必要ではないか。

ここで開発した技術は他の分野での応用も考えられ、将来技術のシーズを提供していると思う。基礎研究だけでも大学、理研等で継続する必要があるのか、ないのかサイクル機構としての考え方を記述して欲しい。

ウラン濃縮技術は、いわゆる機微情報であり、一般的な技術情報と区別しなければならない。とりわけ、実用化に繋がる要素技術の情報は、ウラン濃縮技術の実用化に止まらず、核燃料の生産・再処理技術に直結する。特許制度は、社会的にみて機微性をもたない経済財のうち、通常の市場取引によってはその生産費用（コスト）はもとより利潤の確保が困難な財に適用される制度である。本研究開発の成果に基づく技術情報は、技術の社会的性格からみて、その開発費用を市場取引によって回収すべき性格のものではない。したがって、特許出願に際しても、特定の開発成果に限定される。このように考えると、本研究開発の成果に関する特許出願・取得の実績は、機微性を保持した範囲内で、適切かつ妥当なものと評価される。

成果の発表について、我が国には欧米のような秘密特許の制度がないことが特許化を妨げているとの指摘があった。この点は、世界的な知的所有権保護重視の流れに加えて、研究者のインセンティブにも大きく関わるものであり、必要であれば特許制度の見直しも含めて国に提言するべきであると考ええる。

機微情報が含まれているという制約の中での成果の公表も十分に行われており、また応用研究の波及技術も図られ、研究成果は高い評価を受けていると認められる。

成果の発表については、許される範囲で良く行われてきたが、機微情報に属するとの見方から 殆どは社内資料に留まっている。これらは見直して、科学的成果として公開できる物は発表することが望ましい。波及効果も優れた物もあるが、上記の理由から制限されている場合もあろう。

公開論文数など十分とはいえない。これは機微情報管理による制限のためやむをえなかったのかもしれないが、関係者の努力を促したい。機微情報に触れない波及技術については、今後できる限りまとめて発表するよう強く要望する。

機微技術故の制限がある中で良く成果発表、特許出願・取得をしている。今技術の集約を行うに当たって、更に発表できる物がないか、検討を期待したい。

レーザー自体は汎用技術であるが、スペックが他の産業と必ずしも近くないため、開発

技術の波及については苦勞しているようである。しかし中には商品化された技術もあり、努力は評価したい。

超音速ノズルの高速希薄流体解析技術は、いずれ応用分野が見つかると思うので許せる範囲で公表しておくことが望まれる。

研究の性格上成果の公開が制限される場合も多いと予測される。このような状況下では十分な報告、発表が行われていると評価できる。

ノズルの解析や設計技術、レーザーの高繰り返し化技術などは一般性のある技術であり、成果の詳細な公開、普及を進めることが望ましい。

成果の普及、公開について、機微情報を極力公開して、レーザー応用技術一般の展開が促進されることを期待したい。

参 考 資 料

核燃料サイクル開発機構

参 考 資 料 目 次

参考資料 1	研究開発課題の事後評価について（諮問）	(1)
参考資料 2	評価結果に対する措置	(3)
参考資料 3	分子レーザー法ウラン濃縮技術開発（課題説明資料）	(6)
	[研究開発課題説明資料本文]	(7)
	[用語の説明]	(23)
参考資料 4	分子レーザー法ウラン濃縮技術開発（OHP 資料）	(25)
参考資料 5	分子レーザー法ウラン濃縮技術開発 自己評価書	(75)
参考資料 6	課題評価委員の評価意見等に関する補足説明	(83)
参考資料 7	分子レーザー法ウラン濃縮の研究開発	(96)
	－基礎研究から工学研究への発展－	
	（理化学研究所資料）	

参 考 資 料 1

研究開発課題の事後評価について（諮問）

11 サイクル機構(経企) 030

平成11年8月26日

研究開発課題評価委員会

(高速炉・燃料サイクル課題評価委員会)

委員長 岡 芳明 殿

核燃料サイクル開発機構

理事長 都甲 泰



研究開発課題の事後評価について(諮問)

研究開発外部評価規程第7条第1項に基づき、次の事項について諮問致します。

なお、検討結果については、平成11年11月下旬までに答申を示されたく申し添えます。

・ 諮問事項

「分子レーザー法ウラン濃縮技術開発」に関する事後評価

以上

参 考 資 料 2

評価結果に対する措置

研究開発課題評価委員会

「分子レーザー法ウラン濃縮技術開発」の評価結果に対する措置

平成 11 年 12 月 17 日

核燃料サイクル開発機構

「分子レーザー法ウラン濃縮技術開発」の事後評価における御指摘について以下の措置をとることとしたい。

1. サイクル機構又は他機関での基礎研究の継続及びレーザー設備等の有効利用

赤外多光子解離を利用する分子法レーザー同位体分離技術はウラン以外の多くの元素に適用が可能であり、新しい同位体制御材料の創生など将来のブレークスルーを生み出す可能性のある重要な基盤技術である。この意味においても本プロジェクトの終了により、これまで積上げられてきた成果が四散してしまうことや、分子法の研究者が居なくなってしまうことや、レーザー技術の進展が将来的に革命的なコスト低減をもたらす可能性があることなどを考慮すると、これまで開発されたレーザー設備等、機器の有効利用という観点からも、サイクル機構、あるいは他の研究機関において、基礎研究を継続することが望ましい、という御指摘に対して、

- ・ 動燃改革において、ウラン濃縮事業は整理事業となっており、サイクル機構法に定める業務範囲外であり、現行法下では分子レーザー法ウラン濃縮に係る研究継続は不可能であります。
- ・ 平成 6 年改定の原子力開発利用長期計画では「原子法、分子法の研究開発を次の段階に進めるべきか否かを 2000 年頃までに判断する」こととしております。従って、現在進められている国の長計改定の場合、評価結果を基に、分子法の今後の進め方についてご審議頂くこととします。
- ・ これまで動燃で開発してきた分子レーザー法濃縮技術を継承して、同位体分離等の新たな技術開発を行なうことを希望する機関があれば、サイクル機構は協定を結んで機微情報の管理を行なえる機関であることを確認した上で、技術移転を行なうこととします。
- ・ レーザー設備等機器の有効利用については、レーザー除染技術開発の分野での利用を図っておる処ですが、それに加えて、公募型研究等での利用対象施設としてインターネットで案内する等有効利用の促進を図っており、今後も継続して努力していくこととします。

2. 技術情報の公開

ブレークスルーを加速するには、本プロジェクトで得られた成果をできるだけ公開し、知的財産として共有することが重要である。機微技術としての制約はあるもののできるだけ公開を希望する、との御指摘に対して、

- ・核兵器技術の拡散につながる恐れのある機微情報等を除いて、積極的に情報公開に努めており、32 件の内部資料を公開してきています。今後も、研究者及び一般からの情報公開請求に対して、機微情報を除き積極的に公開に努めていくこととします。

3. 基礎研究の進め方

基礎研究のあり方について、

- ・機構の全経費の数％は基礎研究に回し、研究者の自主的判断で研究が行えるようにすべきである。
- ・原子力の基礎研究のあり方について大学を含めて見直し、資金が大学等にも回るような体制を作るべき。
- ・業務を遂行する上でレベル「0」の研究の必要性が生じた場合には、他機関でその研究が実施できるようなシステムを作るべきである。但し、プロジェクトの基礎を支える基盤研究については、サイクル機構で実施することが望ましい。目的を特定しない基礎研究については、大学等にまかせて連携を図るのがよい。

以上の御指摘に対して、

- ・サイクル機構の設立趣旨から、機構自身が相当の額の予算を使い、目的を特定しない基礎研究を行なうべきではないと考えます。
- ・本年3月に策定したサイクル機構の「中長期事業計画」における2.3 事業の進め方で示したように、サイクル機構はその使命を達成するため、革新的な技術の採用などにより技術のブレークスルーを促すような研究環境にすることが重要と考えております。そして、事業を進めるに当たっては、ニーズに合った研究開発を、大学、関係機関および民間と緊密な連携をとりながら行ないます。従って、業務遂行上、必要が生じた基盤研究については、一定の制約の下、サイクル機構の裁量で柔軟に進められるよう、出来るところから努力して参ります。

参 考 資 料 3

分子レーザー法ウラン濃縮技術開発（課題説明資料）

本資料は、課題評価委員会の評価
意見等により改訂したものである。

分子レーザー法ウラン濃縮技術開発

平成11年9月

核燃料サイクル開発機構

目 次

1. 研究開発の目的・意義	1
2. 研究開発目標の設定	2
3. 研究開発計画	3
4. 研究開発体制	6
5. 研究開発成果	
(1) 成果の内容について	7
(2) 実用化との関係について	9
(3) 成果の普及、公開について	10
表 1 分子レーザー法ウラン濃縮技術開発スケジュール	11
【参考】	
参考 1 分子法の原理及び概要	12
参考 2 赤外多光子解離について	12
参考 3 経緯	13
【用語の説明】	15

1. 研究開発の目的・意義

分子レーザー法ウラン濃縮（以下「分子法」と言う。）は、個別的分離法であり、統計的分離法であるガス拡散法や遠心分離法に比べ同位体選択性が高く、一回の操作で軽水炉燃料として必要な濃縮度を達成できることから、プラント建設コストおよび消費エネルギーを低く抑えることができ、濃縮役務コストを大幅に引き下げられる可能性がある。また、回収ウランや劣化ウランを原料として使用することも可能であり、ウラン資源の有効利用にもつながるため、次世代の有力なウラン濃縮法の一つとして研究開発を行う意義がある。

旧動力炉・核燃料開発事業団（現核燃料サイクル開発機構）では、昭和 62 年の原子力開発利用長期計画に基づき、理化学研究所における原理実証研究の結果を工学規模の装置を用いて実証することを目的として、昭和 63 年から研究開発（以下、「第一期研究開発」と言う。）を開始した。

なお、昭和 61 年 10 月に原子力委員会に報告されたウラン濃縮懇談会報告書では、当面以下に示す技術水準を達成することが目標とされた。

- ・原理実証試験を引き続き推進し、昭和 62 年度頃までに原理的に約 5% の濃縮が可能であることを確認する。更にその成果を踏まえて、昭和 65 年度頃に原子法との比較評価を行いうるよう努める。

平成 4 年 8 月に原子力委員会に報告されたウラン濃縮懇談会報告書における第一期研究開発に対する評価は以下のとおりであった。

- ・理研においては、約 3.7% の濃縮ウランが分離され、また、他の技術よりもエネルギー効率が高いことが推定されている。動燃において実施された工学実証試験では、比較的短時間で分離能力の向上が図られている。

また、同報告書の

- ・分子法は潜在的には優れた可能性を持つ技術であり、その可能性を見極めるために今後も開発を継続し、原子法に係わる評価検討の時期にそれまでの成果を評価検討することが適当である。

という今後の技術開発の進め方を受けて、旧動力炉・核燃料開発事業団では第二期の研究開発計画を策定した。

なお、この報告書には、今後の国内ウラン濃縮事業化推進に当たっての基本的な考え方が以下のように整理されている。

- ・今後 20 年間程度は、供給能力過剰の状態推移するものと予想されているが、エネルギーセキュリティの観点から一定の国内供給能力及び技術力を保有するとい

う我が国の濃縮路線の意義には基本的にはいささかの变化もないと考えられる。

- ・高い経済性の潜在的可能性を持つ新濃縮技術の開発は我が国のエネルギーセキュリティをより確かなものとするためにも重要である。
- ・新濃縮技術は原子核科学技術にとっても、同位体元素の特性研究、同位体の利用技術の研究等を行うための中心となる技術であり、ウランのみに限らず、各種の同位体分離にも利用される可能性を考慮することが重要である。
- ・新濃縮技術の開発による波及効果が他の科学技術分野のブレークスルーや産業の高度化をもたらす可能性が大きいことに留意する必要がある。

2. 研究開発目標の設定

第一期の研究開発に関する評価の結果、平成 6 年 6 月の原子力の研究開発及び利用に関する長期計画の改定では、「…レーザ法濃縮技術については、原子法、分子法の研究開発を次の段階に進めるべきか否かを 2000 年頃までに判断します。…」との判断がなされ、分子法の研究開発は第二期へと進むこととなった。第二期の研究開発を進めるにあたっては、平成 12 年頃に予定されている次の評価検討に対応し、かつ長期的な分子法の開発ステップを考慮し、以下の考え方を前提とした。

- ・実用化段階での必要条件から判断し実用化を見通す上では、量的課題であるレーザーの繰り返し数においては 1kHz、質的課題である濃縮度においては 3%以上の成果が得られていることが必要になる。
- ・そのため、濃縮度の向上については、基礎的知見の充実を図りつつ工学実証試験施設等を活用した研究開発を継続する。
- ・一方、レーザーの高繰り返し化については、実用化を見通す上で基本となる繰り返し数(kHz 級)で発振するレーザーの機器の開発を行う。
- ・また、分子法を単に遠心分離法に続くウラン濃縮技術の延長としてではなく、むしろ遠心分離法よりもさらに広範囲な元素にも適用できる同位体分離技術であり、原子力、医療、基礎科学分野に応用できる可能性に富んだ次世代の原子力基盤技術としてのレーザー開発と捉え積極的に開発していく。

① 工学試験

分離特性を把握して、技術的可能性を見極めるとともに、一段の濃縮により、濃縮度 3%以上の製品 UF_5 の分離及び捕集できることを実証する。

② レーザー開発

kHz 級レーザーシステム及び関連技術の技術的見通しを得るために、繰り返し数 1kHz 程度で安定に発振する炭酸ガスレーザーシステム（発信器 1 台＋増幅器 1 台）の開発を行う。

合わせて繰り返し数 1kHz 程度のラマンレーザーを開発し、炭素ガスレーザーと組み

合わせ、ラマン変換を確認する。

繰り返し数 1kHz 程度のレーザー光に使用可能な工学材料の開発を行う。

③ プラント設計研究

実用プラントに関するフィージビリティ・スタディを実施し、将来の技術的可能性及び経済性を評価する。

④ 応用研究

分子法の研究開発に係る技術的波及効果としての有用同位体分離等の応用研究を進める。

3. 研究開発計画

第二期における研究開発目標を達成するために、以下のような研究開発計画を策定した。

① 工学試験

第一期研究開発では、理化学研究所の原理実証研究結果を基にウラン濃縮試験を実施したが、達成できた濃縮度は約 1.3%であり、目標とした 3%は達成できなかった。このため、第二期研究開発においては、分離性能を左右する主要な要素である超音速ノズルと分離スキームに関する基礎研究を行い、各々の最適化を図ることで分離性能の向上を図る。

開発の進め方としては、超音速ノズル最適化研究と分離スキーム最適化研究を同時並行して進め、適宜これらの研究成果を反映したウラン濃縮試験を行い分離性能を確認する。

a) 超音速ノズルの最適化

超音速ノズル開発で重要な点は、 UF_6 とキャリアーガス (Ar 、 Kr 等の単原子分子ガスや二原子分子ガス) の混合ガスを凝させることなく極低温まで断熱膨張によって一様に冷却し、かつ、できるだけ高い UF_6 分子数密度を達成することである。

極低温に冷却することで、 UF_6 分子の振動温度が下がり振動基底状態に存在する UF_6 分子の数が増加することから、レーザーによる選択励起の対象となる分子が増え、製品量の増加につながるとともに、ホットバンドの減少および回転エネルギー分布の狭帯域化にともなう同位体選択性の向上につながる。

また、高い UF_6 分子数密度を達成することで、相対的に超音速ノズルへの原料ガス供給流量を減らすことができ、プロセス機器類 (圧縮機、超音速ノズル、配管等) の小型化につながる。(UF_6 分子数密度が低い場合は、原料ガス供給量が多くなり場合によっては、プロセス機器類の容量が大きくなりすぎ、プラントとして成立しなくなる。)

第一期研究開発では、断熱膨張を仮定した一次元の理論式により設計された超音速ノ

ズルで、理研での原理実証研究に使用されたものと同形のものを使用し、基礎研究に基づく系統的な開発は実施していなかった。

このため、第二期研究開発では、まず第一にノズル内の流体の流動特性を把握するための測定技術を確認する。開発すべき測定技術としては、UF₆温度測定技術、凝縮測定技術、密度測定技術及び流れの可視化技術である。次に、ノズル内流動三次元解析コードを作成し、いくつかのノズルについて開発した測定技術を用いて測定した温度、圧力、流動状態（境界層厚さ、衝撃波位置等）と解析結果を比較することで解析コードの改良及び検証を行い、解析コードを完成させる。最後に、この解析コードを用いてノズル形状を最適化するとともに、キャリアーガスの種類、UF₆ガスの混合比等を流動試験によって最適化する。

開発目標の目安としては、UF₆分子が凝縮することなく、UF₆分子が90%以上振動基底状態に存在する冷却温度を達成することである。

b) 分離スキームの最適化

分離性能に影響を与える主なパラメータは、照射するレーザー波長の数およびそれらの光強度、個々のレーザー光パルスの遅延時間、UF₆分子の冷却温度等である。

赤外光の多光子吸収を用いたレーザー同位体分離の一般的傾向としては、

- ・レーザー光フルエンスが低いほど分離係数は高いが、反応生成量は少なくなる
- ・レーザーの照射波長の数を増やすと、分離係数は向上する
- ・分子の温度が低いほど、分離係数は高い

である。

分離コストを考えると、レーザーの照射波長の数をできるだけ少なく、光強度も低く、冷却温度も高い方がよい。このため、必要な分離係数を確保し、経済的に成り立つ反応生成量を得るためには、上記のパラメータを含むレーザーの照射条件を最適化する必要がある。

赤外多光子吸収過程は、その複雑さのため、理論計算によって正確に予測することは困難であり、試験によってレーザーの照射条件を最適化しなければならない。

しかしながら、最適化すべきパラメータは、波長、波長数、各々の波長の光フルエンス、UF₆分子温度等でその組み合わせは膨大な数にのぼる。これらの最適化を、試験準備を含めると数日かかる工学試験装置を用いたウラン濃縮試験により実施するならば膨大な日数がかかることになる。そこで、レーザー照射毎に、リアルタイムで製品濃縮度の測定が可能で、効率的にパラメータの分離性能への影響を評価できる、多光子イオン化/飛行時間型質量分析とUF₆分子ビーム発生装置を組み合わせた分離特性測定試験装置を開発する。

分離特性測定試験装置を用いた分離基礎試験によりレーザー照射条件の絞り込みを行い、ウラン濃縮試験によって最終的なレーザー照射条件の最適化を行う。

開発目標としては、分離特性のレーザー光波長依存性、レーザー光強度依存性、冷却温度依存性等を把握し、分離スキームの最適化を図って、分離性能の技術的可能性を見極めるとともに、一段の分離で、軽水炉燃料に必要な濃縮度（3%以上）が得られレーザー照射条件の確立を目指す。

② レーザー開発

第一期研究開発では、世界で初めて繰り返し数 100Hz の $16\mu\text{m}$ レーザーシステムを開発したが、第二期研究開発ではさらに開発を進めて、ほぼ実用化可能な kHz 級の繰り返し数のレーザー開発を実施する。(kHz 級レーザーを複数台組み合わせることで数十 kHz の繰り返しを達成できる。)

分子法レーザーシステムは、パルス炭酸ガスレーザー（発振波長 $\sim 10\mu\text{m}$ ）とその光を UF_6 分子の励起に必要な $16\mu\text{m}$ 光に変換するためのラマンレーザーから成っており、また、多くの光学部品（光学窓、ミラー等）が使用されている。これらの各々について、kHz 級の繰り返しに必要な技術開発目標を定め、開発を実施する。

a) 1kHz パルス炭酸ガスレーザーの開発

分子法の実用化には、超音速ノズル中を数百メートルの速度で流れる UF_6 ガスを全てレーザーで照射する必要がある、そのためには、レーザービームの大きさを $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ と仮定すると、レーザーの繰り返し数として数十 kHz が、そして、パルスエネルギーとしては数 J の高エネルギーが要求される。

しかしながら、このようなレーザーシステムは、平均出力で百キロワットを超えるもので、技術開発には長期間を要することから、実用化を見通すための第一段階として kHz 級のレーザーを複数組み合わせるシステムを想定した開発を実施する。

また、経済性向上のため、レーザーの高効率化（レーザー台数の削減及びそれにとともなう設置面積の低減化ならびに消費電力の削減が期待できる）にも取り組む。

第一期研究開発における理研の 1kHz パルス炭酸ガスレーザー研究開発の成果をもとに、繰り返し 1kHz、パルスエネルギー数 J の実用試験機の設計研究を行い、その結果に基づいて、理研の要素試験機を用いて放電技術、レーザーガス循環技術、不安定共振器の採用による発振効率の向上等の要素技術開発を実施し、実用試験機の製作に必要なデータを取得する。

これらのデータをもとに、実用試験機を製作し、長時間連続運転による問題点の抽出及び対策を行い、技術を確立する。

b) 1kHz ラマンレーザーの開発

ラマンレーザーは、パラ水素分子の誘導回転ラマン散乱（回転量子数 $J=0$ と $J=2$ の間の遷移）を利用して、パルス炭酸ガスレーザーの $\sim 10\mu\text{m}$ 光を $\sim 16\mu\text{m}$ 光に変換するものであるが、レーザーの高繰り返し化にともない、ラマン散乱によってパラ水素分子に蓄えられたエネルギーの緩和が間に合わなくなり、回転量子数 $J=0$ のパラ水素分子が減少するためラマン変換効率が減少する。

第一期研究開発において、繰り返し数 100Hz でラマン変換効率の減少が見られ、繰り返し数 1kHz では、対策が必要であることから、効率的なパラ水素ガスの循環冷却方法を開発する。

高繰り返し時のパラ水素ガス温度解析計算およびラマン変換解析計算を行い、パラ水素ガス循環冷却方式の設計研究を行い、試験装置を製作して、工学試験装置の 100Hz パルス炭酸ガスレーザー光を入射光として性能評価および改良を行い技術を確立する。

その後、1kHz パルス炭酸ガスレーザー実用試験機と組み合わせ試験を行い、性能を確認する。

c) 高繰返し用光学材料の開発

分子法のレーザーシステムで使用されている光学部品の中で最も光学損傷に注意しなければならないのは、パルス炭酸ガスレーザーの透過窓等として使われている ZnSe の基板に無反射コーティングを施した光学部品であり、第二期研究開発においては、1 kHz パルス炭酸ガスレーザー実用試験機の長時間連続試験（数十時間以上）に耐えられるものを開発する。

理研の 1kHz パルス炭酸ガスレーザー試験装置（パルスエネルギー500mJ）のレーザー光を集光することで 1kHz パルス炭酸ガスレーザー実用試験機の耐光強度仕様条件（光フルエンス $2.0\text{J}/\text{cm}^2$ ）を模擬し、耐光強度試験を実施して寿命を推定する。

試験に供する光学部品は、市販の輸入品および国産の試作品とし、試験結果により国産試作品の改良等を行い、1kHz パルス炭酸ガスレーザー実用試験機の長時間連続試験（数十時間以上）に使用できる光学部品を開発する。

③ プラント設計研究

第二期研究開発で得られる開発成果を基に、1,500 tSWU/y の商業プラント概念設計を行うとともに経済性評価を実施し、技術的及び経済的可能性を評価する。

④ 応用研究

^{13}C 等の有用同位体のレーザー同位体分離技術の開発およびレーザービーム利用技術開発を実施する。

⑤ 研究開発スケジュール

表 1 に開発スケジュールを示す。

4. 研究開発体制

分子法の研究開発を進めるにあたって、旧動力炉・核燃料開発事業団では、東海事業所 ウラン濃縮開発部 開発課（その後、平成元年の組織改正で東海事業所 核燃料技術開発部 新型濃縮技術開発室）が研究開発の実施にあたった。予算、人員等については、5. 研究開発成果に記載するとおりである。

理化学研究所とは研究協力協定を締結して、第一期研究開発、第二期研究開発を通して密接な協力関係を維持した。第二期研究開発では、理化学研究所はブレイクスルー研究、旧動力炉・核燃料開発事業団は工学試験等を担当したが、旧動力炉・核燃料開発事業団は、レーザー開発における指導や設備利用といった面で理化学研究所の協力を受けた。また、適宜情報交換を行った。

大学等との関係については、東京工業大学、東北大学、埼玉大学、京都大学等に分子

法の開発に関わる基礎的な研究課題について、研究の委託を行った。また、産業創造研究所や新日本製鐵株式会社に対しては、レーザー関係の基礎的な研究課題について、研究の委託を行った。

第一期研究開発または第二期研究開発において、旧動力炉・核燃料開発事業団に協力して研究開発にあたった国内のメーカーは、炭酸ガスレーザーの開発に関しては株式会社東芝、三菱電機株式会社、株式会社日立製作所、日揮株式会社、ラマンレーザーやプロセス設備に関しては三菱重工業株式会社、光学材料開発に関しては住友電工株式会社、プラント設計研究に関しては三菱マテリアル株式会社、株式会社日立製作所であった。

また、旧動力炉・核燃料開発事業団の分子法の研究開発に対する指導助言を受けるため、国内の大学及びメーカーの有識者からなる「分子レーザー法ウラン濃縮技術委員会」を組織した。

第二期研究開発に使用した設備・機器は、基本的に第一期研究開発で開発したものである。工学試験では、100Hz のレーザーシステム（二系列の炭酸ガスレーザー・ラマンレーザーシステムと一系列の高気圧型炭酸ガスレーザーシステム）とプロセス装置（ノズル型反応装置、ルーツ型圧縮機、製品・廃品回収装置等から構成される閉ループ構造の大型プロセスガス循環装置）を使用し、捕集した製品 UF_6 の濃縮度は専用の表面電離型質量分析器で測定した。また、分離特性の測定には飛行時間型質量分析器を組みこんだ分子線発生装置と 100 Hz レーザーシステムを使用した。

レーザー開発では、旧動力炉・核燃料開発事業団で必要な要素を設計製作し、理化学研究所に設置されていた kHz 級レーザー要素試験装置に付加してデータ取得等の試験を行った。

5. 研究開発成果

(1) 成果の内容について

① 工学試験

a) 超音速ノズルの最適化

温度測定技術、凝縮測定技術、流れの可視化技術、ノズル流動解析技術等を開発し、ノズル形状、キャリアーガスの種類、 UF_6 ガス混合比を最適化して、 UF_6 分子が凝縮することなく UF_6 分子が 90%以上振動基底状態に存在する冷却温度を達成した。

本開発において、超音速ノズルの設計法を確立することができ、実用化に向けた技術的基盤は確立できたと考える。

b) 分離スキームの最適化

分離基礎試験において、最大分離係数約 15（天然ウランを約 10%まで濃縮できる性能）を達成し、分子法の原理的性能を確認した。

また、ウラン濃縮試験においては、分析可能な有意量（約 $100\mu\text{g}$ ）の製品 UF_6 を回収できる製品生成量を維持し、濃縮度が最大となるように、レーザー光の波長、フルエ

ンス等を調整した結果、約 2%の濃縮度が得られた。

分離特性のレーザー光波長依存性及びレーザー光強度依存性測定データから、さらなる調整によって濃縮度の向上が予測できるが、濃縮度及び製品生成量ともにさらに向上させるためには、さらなる多波長化等も含めた分離スキームの検討が必要であることが判明した。

したがって、実用化のためには、さらなる分離スキームの最適化の研究開発が必要である。

② レーザー開発

a) 1 kHz パルス炭酸ガスレーザーの開発

理化学研究所の kHz レーザー要素試験装置を用いて、放電技術、レーザーガス循環技術等の開発を行い、設計・製作に必要なデータを取得した。

また、この試験装置によるレーザー発振試験において、瞬間的ではあるが、繰り返し数 1 kHz、パルスエネルギー約 3J を達成した。

実用機としての技術を確立するためには、長時間連続運転による問題点の摘出、およびその対策等さらに研究開発が必要である。

b) 1kHz ラマンレーザーの開発

新概念として、効率的にパラ水素ガスの冷却が行える 2 段階ラマンセル方式を考案し、ラマン変換解析計算等により有効性を確認するとともに、概念設計を行った。

実用機としての技術を確立するためには、試験機を用いたパルス炭酸ガスレーザーとの組み合わせ試験による性能確認が必要である。

c) 高繰り返し用光学材料の開発

理化学研究所の 1 kHz パルス炭酸ガスレーザー試験装置を用いて、市販品および試作品の無反射コーティング・ウィンドーについて耐光強度試験を実施し、 $10^8 \sim 10^9$ ショット以上の寿命があるとの評価結果が得られ、現状技術の延長で対応できる見通しを得た。

③ プラント設計研究

技術的不確定要素はあるもの、これまでの技術開発結果をもとに、濃縮役務能力 1,500tSWU/y の商業プラントの概念設計を行った。また、評価の定量性は基礎研究段階であり信頼性に欠けるが、実用化を視野に入れると、プラントを構成する要素が濃縮コストに与える影響を把握し、課題となる技術的項目を明確にすることが必要なため経済性評価を実施した。

役務コストは、レーザー設備関連コストに大きく依存し、レーザー設備のコストを 1000 万円/kW（現在の加工機用炭酸ガスレーザーの販売価格相当で繰り返し 2.5 kHz）とした場合の評価では、

設備建設費	42,000 万円/tSWU/年
濃縮役務コスト	10,800 円/kgSWU

であった。(電力消費量は約 200 kWh/kgSWU であった。)

また、レーザーの高出力化及び高効率化によってレーザー設備費だけではなく、建家建設費(設置面積の減少による)、ユーティリティー設備、保守費等の削減につながり、役務コストの大幅な低減の可能性がある、レーザーの高出力化および高効率化が実用化上重要な課題であることが判明した。

なお、レーザーの繰り返し数を 10 kHz とした場合、濃縮役務コストは約 8,600 円/kgSWU であった。

④ 応用研究

CF₂HCl を原料として ¹³C および ¹⁴C のレーザー同位体分離試験を行い、それぞれ分離係数で約 1,500、約 1,700 を達成した。

また、レーザー光によるアブレーション効果を利用した、表面汚染金属のレーザー除染試験を行い、除染係数約 200 を確認した。

⑤ 開発認可予算及び開発要員

下表に開発認可予算および開発要員の年度別実績を示す。

年度	S63	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	合計
予算 (億円)	8.6	8.7	13.1	12.3	8.7	8.7	8.6	8.8	5.2	2.7	1.3	86.7
人員 (人)	22	22	23	26	25	25	24	23	23	21	18	—

(2) 実用化との関係について

これまでの研究開発により分子レーザー法は、技術的にも経済性の観点からも、実用化の可能性があることを確認できたが、実用化のための基盤技術としてさらに研究開発を継続する必要があるものもある。

本研究開発で残された課題としては、

- ・さらなる多波長化を含めた分離スキームの最適化
- ・試験機を用いた kHz レーザーシステムの連続運転性能の評価

があげられるが、本研究開発で実施しなかったプロセス機器の開発(微粒子の製品 UF₆ 大量捕集装置の開発、大容量圧縮機の開発等)も実用化のためには必要となる。

また、さらなる濃縮役務コスト低減化のためには、レーザー設備のコスト低減化が必須であり、現在加工機として一般産業界に普及している連続発振の炭酸ガスレーザーのパルス化による 10 kHz 以上の高繰り返し・高出力化等の新しい技術開発が必要と考えられる。

近年、半導体レーザーの技術革新には目覚ましいものがあり、将来さらなるレーザー技術のブレークスルーを生み出す可能性もあり、実用化のための基盤研究開発をさらに継

続し、将来に備えることが望ましいと考える。

(3) 成果の普及、公開について

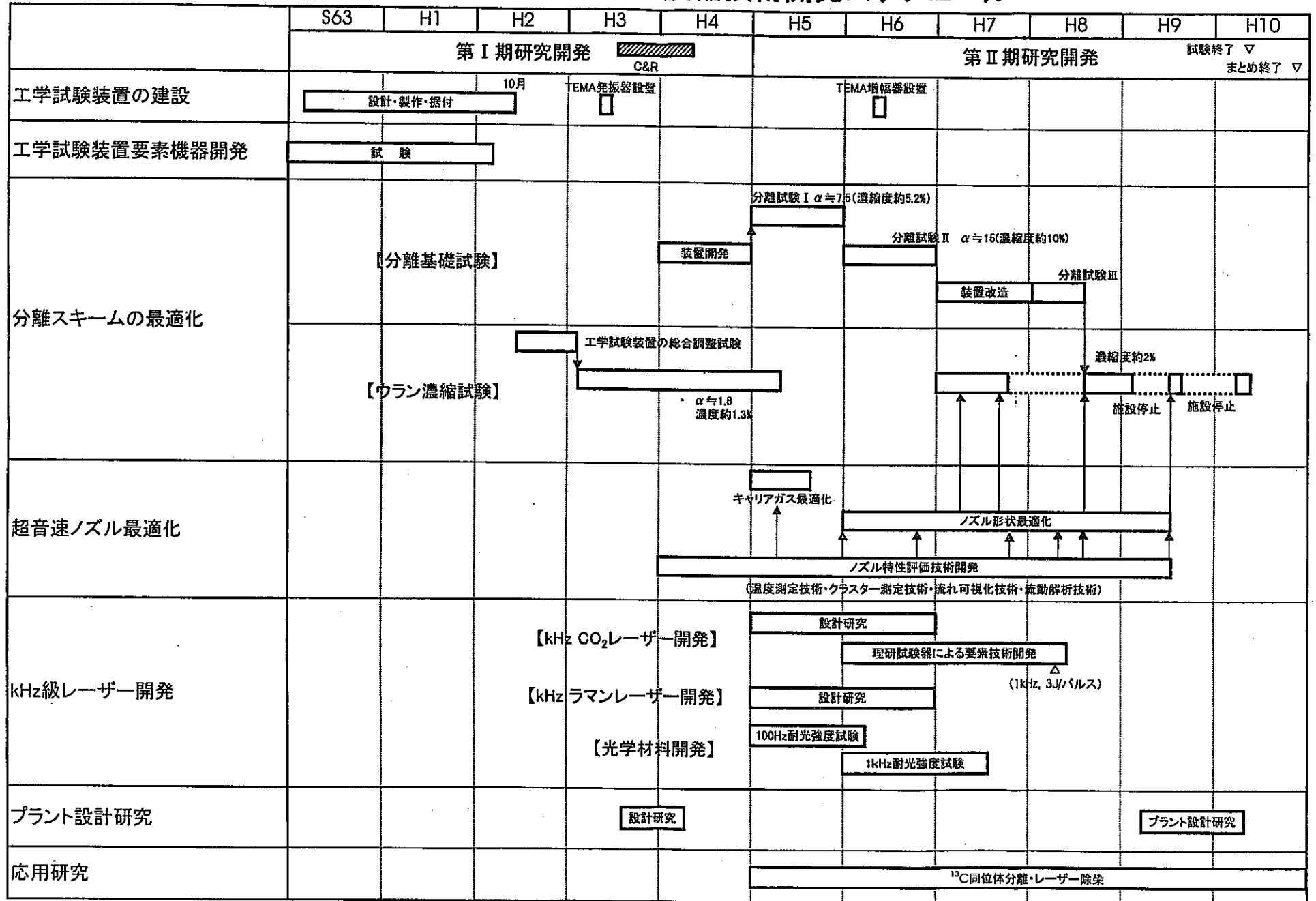
ウラン濃縮技術であるため、分子法の研究開発成果には機微情報が含まれるという制約があるが、分子法関連の学会発表等の件数は以下のとおりである。

国内学会発表	39件	特許等	18件
国際学会発表	13件	社内資料	258件
学会投稿論文等	24件		

応用研究の成果のうち、レーザー除染技術開発は、環境保全技術開発として継続することとなる。なお、レーザー設備については、当面は共同利用施設として活用を図っていくことで検討中である。

また、分子法の研究開発成果を利用した汎用の炭酸ガスレーザーシステムが、開発を担当したメーカーよりカタログ品として販売されている。

表1 分子レーザー法ウラン濃縮技術開発スケジュール



【参考】

参考1 分子法の原理及び概要

分子レーザー法ウラン濃縮（以下「分子法」と言う。）は、現在商業ウラン濃縮で原料として用いられている六フッ化ウラン（ UF_6 ）中の $^{235}\text{UF}_6$ と $^{238}\text{UF}_6$ の赤外吸収波長の微小な差（ ν_3 振動モードの $16\mu\text{m}$ 付近の赤外吸収波長で最も大きく約 0.6cm^{-1} である。）を利用して、 $^{235}\text{UF}_6$ を赤外レーザーにより選択的に振動励起した後、紫外レーザーまたは赤外レーザー（現在では、赤外多光子吸収過程を利用した多波長の赤外レーザー光が用いられている。）によって光解離させ、固体の UF_6 として回収するウラン濃縮法である。

赤外レーザーとしては、単体で $16\mu\text{m}$ 光を発振する適当なレーザーがないため、パルス炭酸ガスレーザーの $10\mu\text{m}$ 光をパラ水素分子の誘導回転ラマン散乱を利用して $16\mu\text{m}$ 光に変換する方式がとられている。

パルス炭酸ガスレーザーはラインで波長可変であるが、 $^{235}\text{UF}_6$ 分子の吸収波長に一致するラインがない。しかし、炭酸ガスレーザーを高気圧型とすることで連続的に波長を可変にできる。そこで、少なくとも最初の励起に使用するレーザーは、波長を $^{235}\text{UF}_6$ 分子の吸収波長に一致させるため高気圧型にする必要がある。

また UF_6 分子は、室温では 99% 以上が熱励起状態にあるため $^{235}\text{UF}_6$ と $^{238}\text{UF}_6$ の赤外吸収スペクトルは重なり合い、光励起による同位体選択性は非常に低く、極低温（100K 以下）に冷却して UF_6 分子を振動基底状態に緩和させ、赤外吸収スペクトルを分離して選択励起を可能にする必要がある。極低温に冷却する方法としては、比熱比の小さな UF_6 ガスを比熱比の大きな単原子分子ガスや二原子分子ガスで希釈し、超音速ノズルより断熱膨張させて冷却する方法がとられており、過冷却状態を利用して比較的高い分子数密度を得ることができる。

参考2 赤外多光子解離について

UF_6 分子のように、赤外領域に吸収のある分子では強い赤外レーザー光の照射により、多数の光子を吸収して解離する。またこのときに、複数の波長のレーザー光を励起、解離と順次照射することも考えられる。最初の励起に使用するレーザー光を弱くすることで、強い光による同位体選択性への悪影響を軽減できるため、同位体シフトの小さい元素の分離へも適用できる。

参考 3 経緯

我が国における分子法の研究は、米国やドイツ（旧西ドイツ）より約 10 年遅れて昭和 57 年頃理化学研究所において始められた。

旧動力炉・核燃料開発事業団（以下「旧動燃事業団」と言う。）においても、分子法を次世代の有力なウラン濃縮技術ととらえ、昭和 60 年度より調査研究等を開始し、本格的な研究開発の開始に備えた。

昭和 62 年度に改定された原子力開発利用長期計画において、旧動燃事業団と理化学研究所が協力して分子法の開発を進めることが示され、昭和 63 年度より認可予算が認められ、第一期研究開発が開始された。昭和 63 年 9 月には理化学研究所と研究協力協定を締結した。

第一期研究開発では、理化学研究所の原理実証研究結果を工学規模の装置を用いて実証することを目的として、100Hz レーザーシステム（ラインチューナブル大気圧動作パルス炭酸ガスレーザーシステム 2 系列、波長変換用ラマンセル 2 系列から成り、16 μ m 光二波長を供給可能）およびフッ化ウラン供給回収装置から成る工学試験装置を開発し、東海事業所の L 棟に設置して平成 3 年 3 月よりウラン濃縮試験を開始した。

理化学研究所の試験使用された同形の超音速ノズルを使用したウラン濃縮試験を行い最高濃縮度約 1.0%（分離係数約 1.4）を達成した。その後、連続波長可変な高気圧動作のパルス炭酸ガスレーザー発振器を増設し、ウラン濃縮試験で、平成 4 年 2 月に濃縮度約 1.3%（分離係数約 1.8）を達成した。

これらの結果をもって原子力委員会ウラン濃縮懇談会による C&R を受け、「技術の可能性を見極める」ため、さらに研究開発を継続することが答申され、平成 5 年度より第二期研究開発を開始した。次の C&R としては、平成 6 年 6 月に改定された原子力開発利用長期計画において「原子法、分子法の研究開発を次の段階に進めるべきか否かを 2000 年（平成 12 年）頃までに判断する」と示され、対応すべく研究開発を進めた。

第二期研究開発では、「技術の可能性を見極める」ため、超音速ノズルの最適化および分離スキームの最適化による分離性能の向上と、量的問題を解決するために必要なレーザーの高繰り返し化技術に取り組んできた。しかしながら、平成 9 年 3 月のアスファルト固化処理施設の火災・爆発事故に端を発した一連のトラブルにより、約 1 年 4 ヶ月にわたる試験施設運転停止があり、さらに、動燃改革によるウラン濃縮事業の整理縮小により、新法人設立にともなって平成 10 年 9 月末に試験を終了した。

昭和 62 年 6 月 原子力委員会において、原理実証に成功した理研式分子法の開発を理研及び動燃が分担して推進することを決定

昭和 63 年 4 月 工学試験装置の機器設計開始
・プロセス機器（動燃、理研）
・レーザー機器（動燃、理研、メーカ）

昭和 63 年 6 月 第 1 回分子レーザー法ウラン濃縮技術委員会開催（6 月 3 日）

昭和 63 年 9 月 理研との研究協力協定を締結

- 平成 1 年 3 月 レーザー機器製作開始
- 平成 2 年 2 月 プロセス機器製作開始
- 平成 2 年 6 月 L棟改造工事終了
- 平成 2 年 10 月 機器据付終了
- 平成 2 年 11 月 総合調整試験開始
- ・ 100Hz 炭酸ガスレーザーシステム
繰り返し数最大 100Hz、最大出力 1200W、定格出力 400～500W の
世界最大級のパルス炭酸ガスレーザーシステムが完成
 - ・ 100Hz ラマンレーザーシステム
変換効率約 30% の高効率ラマンレーザーが完成
 - ・ フッ化ウラン供給・回収システム
最大流量 40Nm³/h の分子法用 UF₆ ガス処理装置が完成
- 平成 3 年 3 月 工学実証試験開始
- ・ ウラン濃縮試験で約 1% の濃縮に成功
- 平成 3 年 8 月 連続波長可変高圧炭酸ガスレーザー発振器の据付
- 平成 4 年 2 月 ウラン濃縮試験で約 1% の濃縮に成功
- 平成 4 年 8 月 原子力委員会ウラン濃縮懇談会報告書の公表
- 平成 5 年 9 月 分離基礎試験により、分離係数約 7.5(濃縮度 5.2%相当)の原理的性能の
確認に成功
- 平成 6 年 2 月 理研との研究協定を改定
- 平成 6 年 3 月 高気圧炭酸ガスレーザー増幅器の増設
- 平成 6 年 6 月 原子力の研究開発及び利用に関する長期計画の改定
- 「…レーザ法濃縮技術については、原子法、分子法の研究開発を次の段階に進めるべきか否かを 2000 年頃までに判断します。…」
- 平成 6 年 10 月 分離基礎試験において、分離係数約 15(濃縮度 10%相当)の原理的性能の
確認に成功
- 平成 8 年 11 月 炭酸ガスレーザー要素技術試験装置を用いて、繰り返し数 1kHz、パ
ルスエネルギー約 3J のレーザー発振に成功
- 平成 9 年 2 月 ウラン濃縮試験において、約 2% の濃縮に成功
- 平成 9 年 3 月 アスファルト固化処理施設火災爆発事故発生 (3 月 11 日)
- ・ 平成 9 年 4 月より平成 10 年 6 月まで試験施設の運転停止
- 平成 10 年 8 月 第 10 回分子レーザー法ウラン濃縮技術委員会開催 (8 月 26 日、最終
回)
- 平成 10 年 9 月 工学試験終了
- 平成 11 年 4 月 理研と共同で最終成果報告会を開催 (4 月 21 日)

【用語の説明】

原子法 (1 頁)

レーザーを用いた同位体分離法の一つであり、金属ウランを電子ビームで加熱し、蒸発したウラン原子のうち ^{235}U を可視レーザー光によりイオン化して電極に回収する方法である。国内では、レーザー濃縮技術研究組合が工学試験を実施している。

断熱膨張 (3 頁)

気体を熱の出入りを伴わずに膨張させること。気体は断熱膨張過程で冷却されるが、比熱比(定圧モル比熱と定積モル比熱の比)の大きい気体ほど冷却効果が高い。

キャリアーガス (4 頁)

気体の断熱膨張過程では、比熱比(定圧モル比熱と定積モル比熱の比)の大きい気体ほど冷却効率が高くなる。 UF_6 は比熱比が小さく冷却効率が低いため、 UF_6 を効率よく冷却するために比熱比の大きい希ガス原子や 2 原子分子(キャリアーガス)と UF_6 を混合し断熱膨張させる方法が用いられる。

振動温度 (3 頁)

平衡状態にある気体分子では、並進エネルギー、回転エネルギー、振動エネルギーの各々の状態を表す温度はすべて等しい。しかし、断熱膨張過程では、キャリアーガスとの衝突による並進、回転、振動のエネルギー緩和時間が異なるため、各々の温度は、並進温度<回転温度<振動温度となり、すべて異なる温度となる。

ホットバンド (3 頁)

振動励起状態に熱分布している分子による吸収バンドをホットバンドと呼ぶ。ホットバンドは、振動ポテンシャルの非調和性のため、振動基底状態に分布している分子の吸収波長よりも長波長側に現れる。冷却された分子では、振動励起状態に熱分布している分子が減少するため、ホットバンドが小さくなる。

多光子イオン化/飛行時間型質量分析 (4 頁)

赤外多光子解離によって生成した UF_6 を可視レーザー光を用いた多光子イオン化によって U^{2+} にイオン化し、同位体比を測定する分析法。飛行時間型質量分析では、イオンを電場で加速し、軽いイオンほど短時間で検出器へ到達することを利用して質量の分析を行う。

UF_6 分子ビーム発生装置 (4 頁)

高真空チャンバーの中へキャリアーガスと UF_6 の混合ガスをパルス状に噴出させ、極低温の UF_6 分子の流れを作る装置。

パルス炭酸ガスレーザー (5 頁)

炭酸ガスレーザーには、出力が連続的な CW 炭酸ガスレーザーとパルス状の出力を発生するパルス炭酸ガスレーザーがある。赤外多光子解離を起こさせるためには、強度の高いレーザー光が必要であり、分子法では、強度の高いレーザー光が容易に得られるパルス炭酸ガスレーザーが用いられる。

炭酸ガスレーザーは、通常は大気圧以下で動作し、 CO_2 分子の振動回転エネルギー準位間の誘導放出によって発振することから、発振波長は離散的となる(大気圧動作炭酸ガスレーザー)。

これに対し、高気圧動作炭酸ガスレーザー {TEMA (Transversely Excited Multi Atmospheric) 炭酸ガスレーザー} では、レーザー媒質ガスの圧力を高めていくことにより、発振利得の圧力広がりが大きくなり、10 気圧程度では発振波長の波長間隔と等しくなることから、波長を連続変化することができる。

パラ水素分子の誘導回転ラマン散乱 (5 頁)

水素分子のうち、2 個の陽子の核スピンの互いに反対方向を向いているものをパラ水素、同方向を向いているものをオルト水素と呼ぶ。

パラ水素分子の回転準位間のラマン散乱を利用することにより、炭酸ガスレーザーの $10\mu\text{m}$ 光を $16\mu\text{m}$ に波長変換することができる。

無反射コーティング (6 頁)

表面反射による透過率の低下を防ぐため、レーザー用光学部品には表面反射を防ぐためのコーティング処理が施されており、これを無反射コーティングと呼ぶ。屈折率の高い誘電体及び低い誘電体を交互にコーティングし、光の干渉作用を利用して表面反射を防ぐ誘電体多層膜コーティングを使用する場合が多い。

濃縮役務能力 (8 頁)

ウランの分離作業量は、どのような濃縮ウラン(濃度及び量)と、どのような劣化ウラン(濃度及び量)とに分離するかによって定められるものである。一例として、天然ウランから 3.5%濃縮ウラン 1kgU を取得する場合の分離作業量は、劣化ウラン濃度を 0.25%とすると、 4.8kgSWU である。

濃縮役務能力は、濃縮プラント 1 年あたりの分離能力であり、単位は、 tSWU/y が用いられる。100 万 kW 発電所の年間燃料取扱量は、 120tSWU に相当する。

アブレーション効果 (9 頁)

強度の高いレーザー光の照射によって、材料表面が 1 万度を超える温度に加熱され、表面層が吹き飛ぶ現象。

参 考 資 料 4

分子レーザー法ウラン濃縮技術開発（OHP 資料）

分子レーザー法ウラン 濃縮技術開発

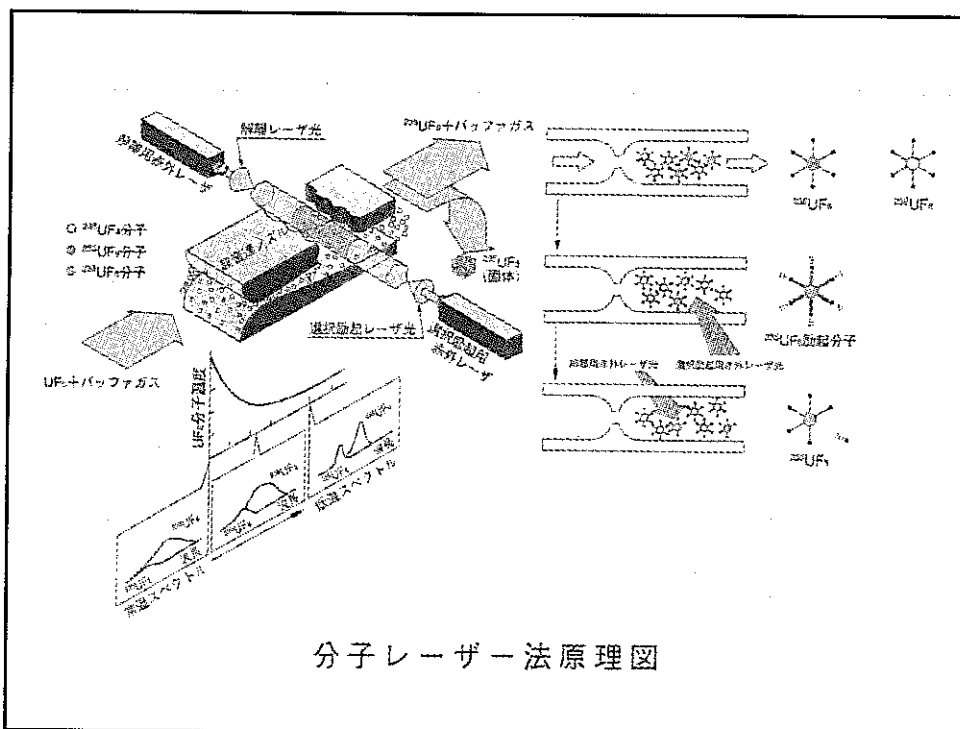
平成11年 9月

核燃料サイクル開発機構

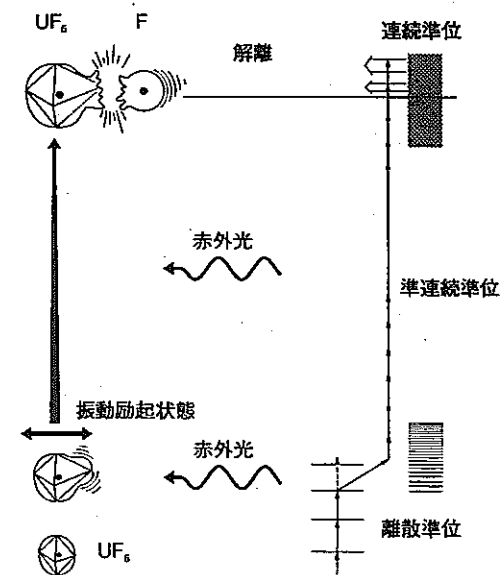
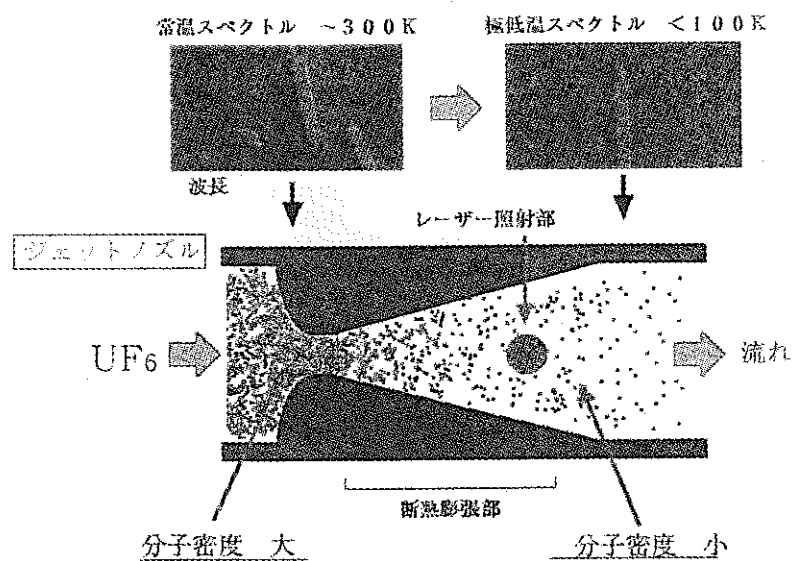
説明内容

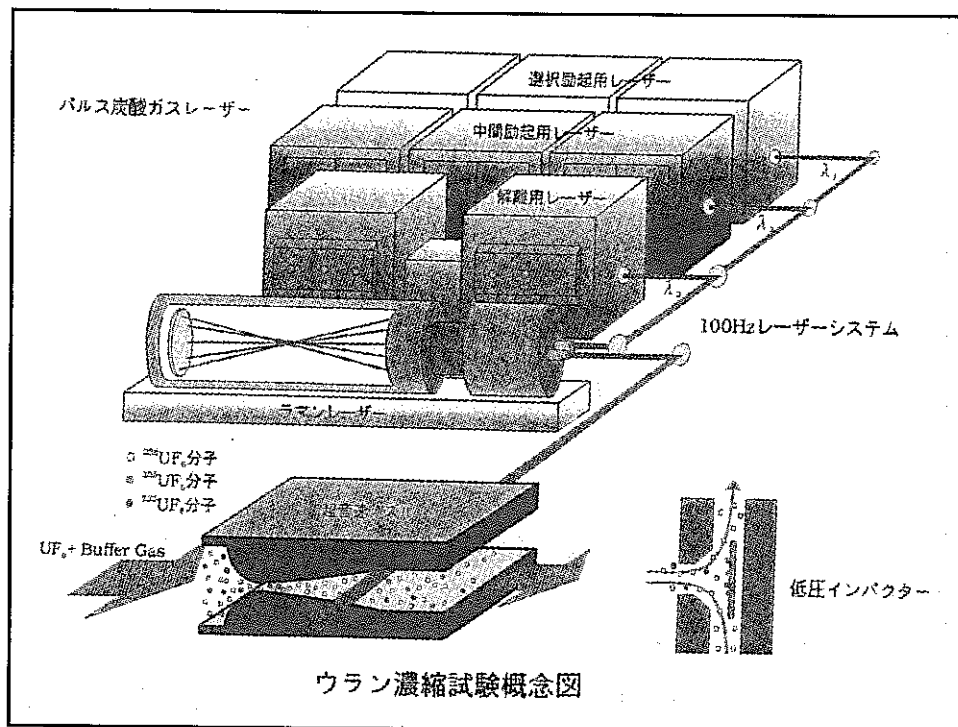
- 分子レーザー法の原理
- 研究開発経緯
- 研究開発の意義・目的
- 研究開発目標
- 研究開発計画
- 研究開発体制
- 研究開発成果
 - ・ 工学試験
 - ・ プラント設計研究
 - ・ 成果公表等
 - ・ kHz級レーザー開発
 - ・ 応用研究
 - ・ 波及効果

分子レーザー法の原理



分子法レーザーウラン濃縮原理図





分子レーザー法の特徴

1. 原料がUF₆であり、既存の核燃料サイクルとの整合性がある。
2. 単原子分子等のキャリアガスとUF₆ガスを混合し、断熱膨張を利用してUF₆分子を冷却する。
3. 赤外レーザー光（波長～16 μm）を用いてUF₆分子を振動励起し、UF₅に解離する。
4. 赤外レーザー光はパルス炭酸ガスレーザー光（波長～10 μm）のパラ水素ラマン散乱による波長変換を利用する。
5. 赤外多光子吸収の理論解析が困難。

研究開発経緯（1）

昭和61年10月 原子力委員会ウラン濃縮
懇談会報告書

昭和62年 6月 原子力長計改訂
ウラン濃縮の経済性向上のため新技
術開発を推進（長計）

研究開発経緯（2）

分子法：動燃及び理研において原理実証研
究等を進め（長計）

→ 原理的に約5%の濃縮が可
能であることを確認

原子法：研究組合方式による民間を中心と
した目標を絞った集中的開発と原
研等による長期的・基礎的な研究
開発（長計）

→ 年間トンswu相当の約5%の
濃縮システム（濃縮懇）

研究開発経緯（３）

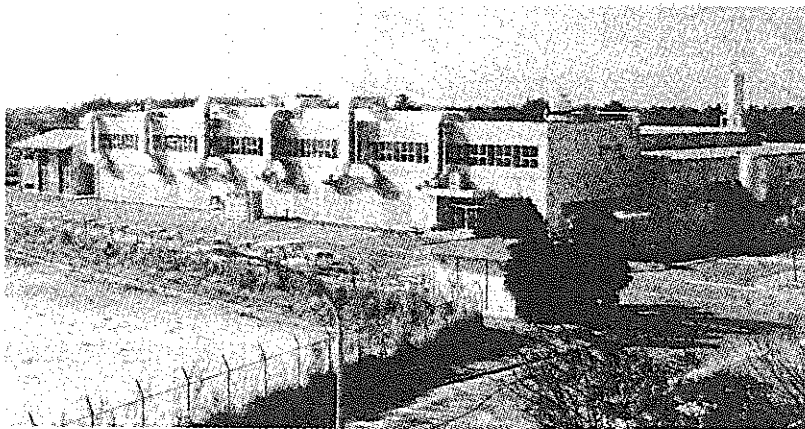
第Ⅰ期研究開発 昭和63年～平成4年

工学試験（旧動燃）

- ・ 工学試験装置の開発
100Hz 16 μ mレーザーシステム
フッ化ウラン供給回収システム
- ・ 濃縮度1.3%の分離・回収に成功

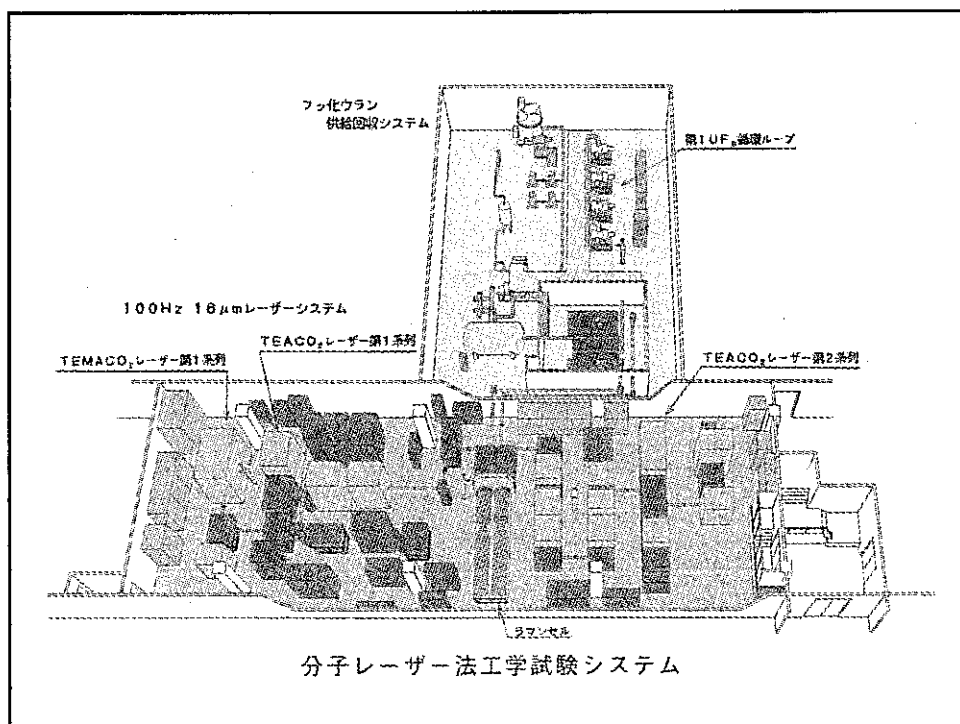
工学基礎試験（理研）

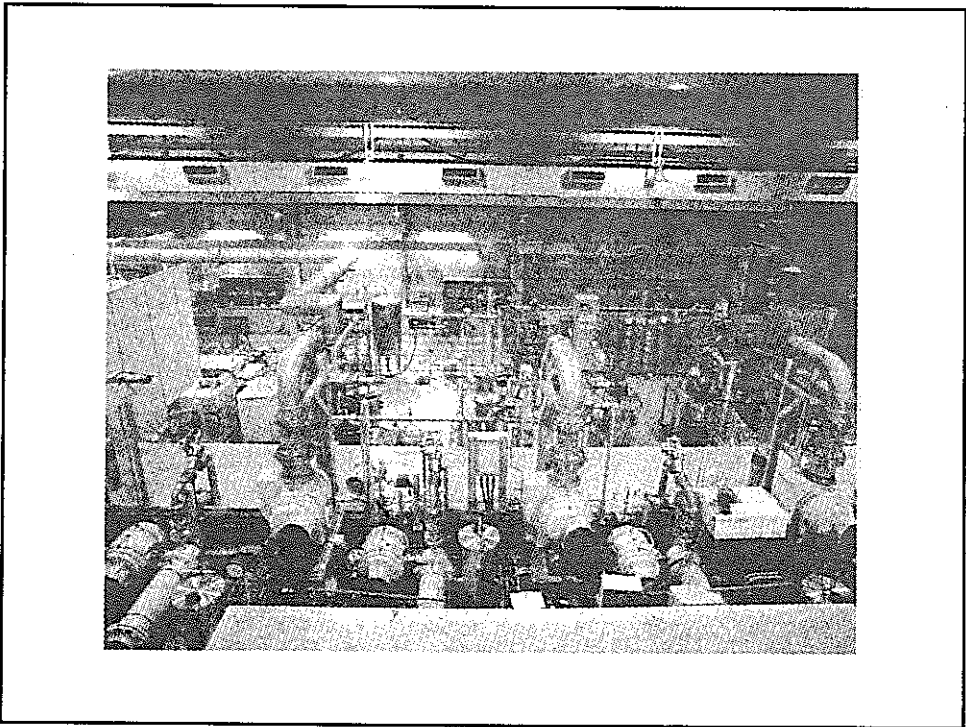
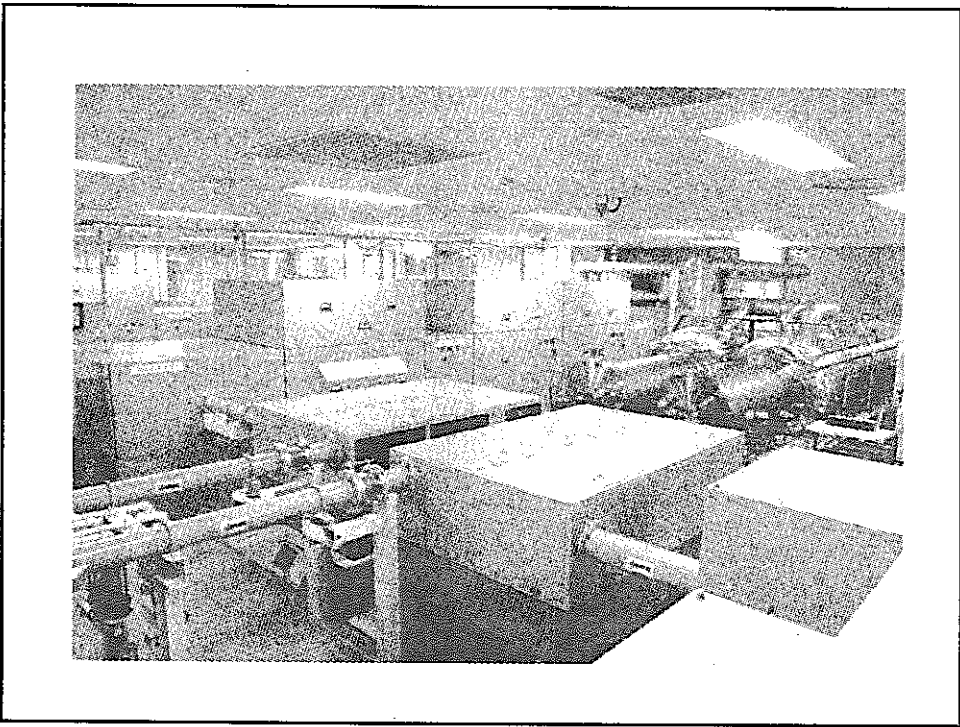
- ・ 原理的に3.7%の濃縮が可能であることを確認



工学試験装置

- ・ 100Hz 16 μ mレーザーシステム
 TEA CO₂レーザー 2系列
 TEMA CO₂レーザー 1系列
 ラマンセル 2系列
- ・ フッ化ウラン供給回収システム
 UF₆循環ループ
- ・ 分離特性試験装置





研究開発経緯（４）

平成3年9月～平成4年8月

・原子力委員会ウラン濃縮懇談会C&R

⇒原子法、分子法ともに“概ね
順調に進展しているが”、昭
和61年に設定した技術水準に
到達していない。

分子法の技術水準：原理的に約5%の濃縮が可能
であることを確認
(実績：3.7%)

国外の動向

(計画策定時 H4年(1992年))

分 子 法

ド イ ツ：ウラニット社（ウレンコの構成員）が
1970年代の初めから研究開発を継続中
(工学規模) ⇒1993年終了

南アフリカ：原子力公社が1980年代初めから研究開
発を継続中（工学規模）⇒1998年終了

原 子 法

フランス：CEAサックレー研究所で1985年より研究
開発を継続中（工学規模）

米 国：LLNLで1970年代初めから研究開発を継
続中（実証規模）⇒1999年7月終了

研究開発の意義・目的(その1)

平成4年8月 ウラン濃縮懇談会報告

1. エネルギーセキュリティの観点から、一定の国内供給力及び技術力を保有。
2. 高い経済性実現の潜在的可能性を持つ新濃縮技術の開発はエネルギーセキュリティをより確かなものとするためにも重要。

研究開発の意義・目的(その2)

3. 原子核科学技術にとっても、同位体元素の特性研究、同位体の利用技術の研究等を行うための中心技術。
4. 開発による波及効果が他の科学技術分野のブレークスルーや産業の高度化をもたらす。

研究開発の意義・目的（その3）

今後の進め方

「分子レーザー法については、未だ工学実証試験に入ったばかりであり、……、技術の可能性を見極めるために、理研はブレークスルー研究を、動燃は工学実証試験装置等を活用し、工学試験を継続し
…

平成6年6月改訂 原子力長計

「レーザー法濃縮技術については、原子法、分子法の研究開発を次の段階に進めるべきか否かを2000年（平成12年）頃までに判断します。」

研究開発目標(1)

1. 超音速ノズル及び分離スキームを最適化して、分離性能向上の可能性を見極める。
(1回の分離で軽水炉燃料に必要な濃縮度を得る。)

➡ 目標値: 捕集製品濃度3%以上

2. 処理量の観点から実用化を見通す上で必要な高出力kHz級レーザーシステムの技術的見通しを得る。

➡ 目標値: 繰り返し数 1kHz
平均出力 500W

研究開発目標(2)

3. 実用プラントに関するフィージビリティスタディを実施し将来の技術的可能性及び経済性を評価する。
4. レーザー応用技術として、有用同位体分離等の研究を行い、適用の可能性を評価する。

研究開発項目(1)

1. 工学試験

- ・超音速ノズル開発
(超音速ノズルの最適化)
- ・分離基礎試験 (分離スキームの最適化)
- ・ウラン濃縮試験
(3%濃縮ウランの分離・回収)

2. 1kHzレーザーシステムの開発

- ・1kHzパルス炭酸ガスレーザー開発
- ・1kHzラマンレーザー開発
- ・光学材料開発

研究開発項目(2)

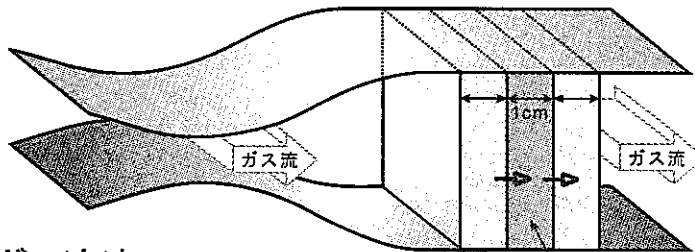
3. プラント設計研究

- ・1500tSWU/y実用プラント概念設計及び
経済性評価

4. 応用研究

- ・光同位体分離技術開発
- ・レーザー除染技術開発

高繰り返しレーザーの必要性



ガス流速: 1000m/s

レーザーパルス幅: $5 \times 10^{-8} \text{s}$

照射位置

レーザーを照射した後、新しいガスは 10^{-5}s

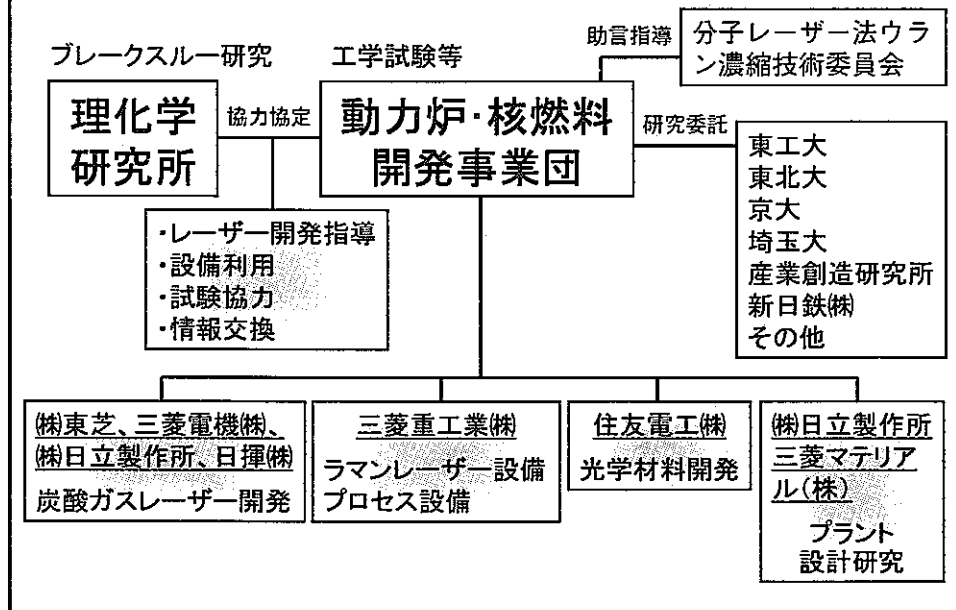
《 $1(\text{cm})/10^5(\text{cm/s})=10^{-5}\text{s}$ 》後に照射位置に来る。

➡ ガスを全て照射するには 10^5Hz (100kHz) のレーザー繰り返し必要。

分子レーザー法ウラン濃縮技術
開発計画（長計改訂を受けた計画）

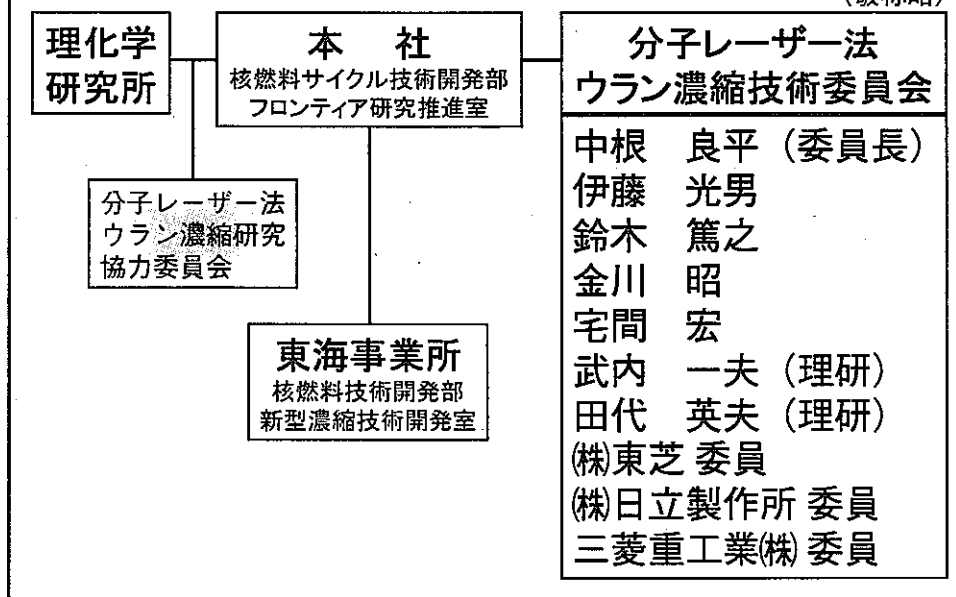
	S63	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11
第Ⅰ期研究開発												
	工学試験装置の建設											
第Ⅱ期研究開発				試験								
							分離スキームの最適化					
							超音速ノズルの最適化					
							kHzレーザー開発					
										プラント設計研究		
							応用研究					

研究開発体制



推進組織

(敬称略)



人員・予算

年 度	S63	H1	H2	3	4
予算(億円)	8.6	8.7	13.1	12.3	8.7
人員(人)	22	22	23	26	25




5	6	7	8	9	10	合 計
8.7	8.6	8.8	5.2	2.7	1.3	86.7
25	24	23	23	21	18	

総認可予算 86.7億円
 大型設備機器 約40億円

研究開発成果(1) -工学試験-

工学試験

工学試験の進め方

装置開発

流体解析技術開発

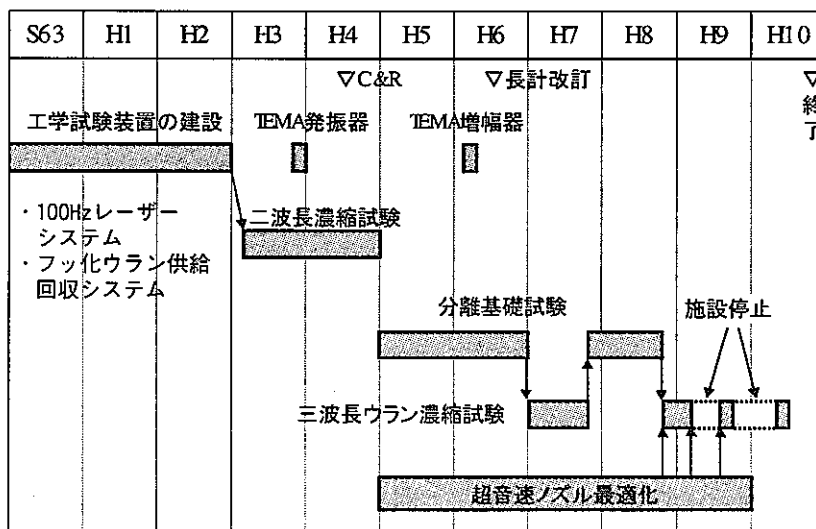
分離基礎試験
・分離スキームの最適化

超音速ノズル開発
・超音速ノズル最適化

ノズル特性評価
技術開発

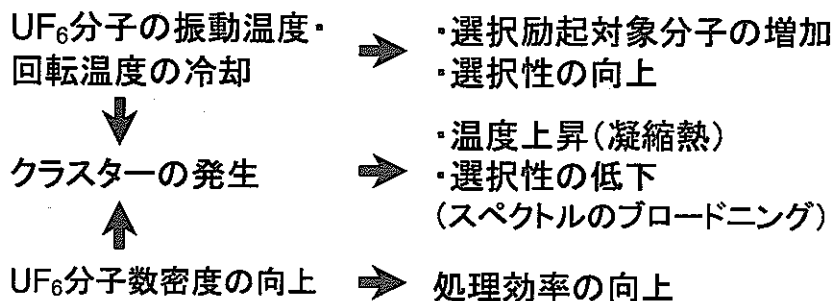
ウラン濃縮試験
工学条件下での実証

工学試験スケジュール



超音速ノズルの最適化

最適化の方向性(課題)



クラスターを生成することなく、できるだけ高いUF₆分子数密度で目標とする冷却温度を達成する。

超音速ノズルの最適化

操作パラメータ

・ノズル形状
・キャリアガス
・UF₆混合比
・上流圧力



・高いUF₆分子密度
・凝縮の防止
・極低温
振動温度
回転温度

超音速ノズルの設計手法の確立

ノズル特性評価技術開発



測定

各種ノズルの評価



設計手法の確立



コードの検証

ノズル流動解析コード開発

ノズル特性評価技術

回転温度評価
振動温度評価
凝縮評価

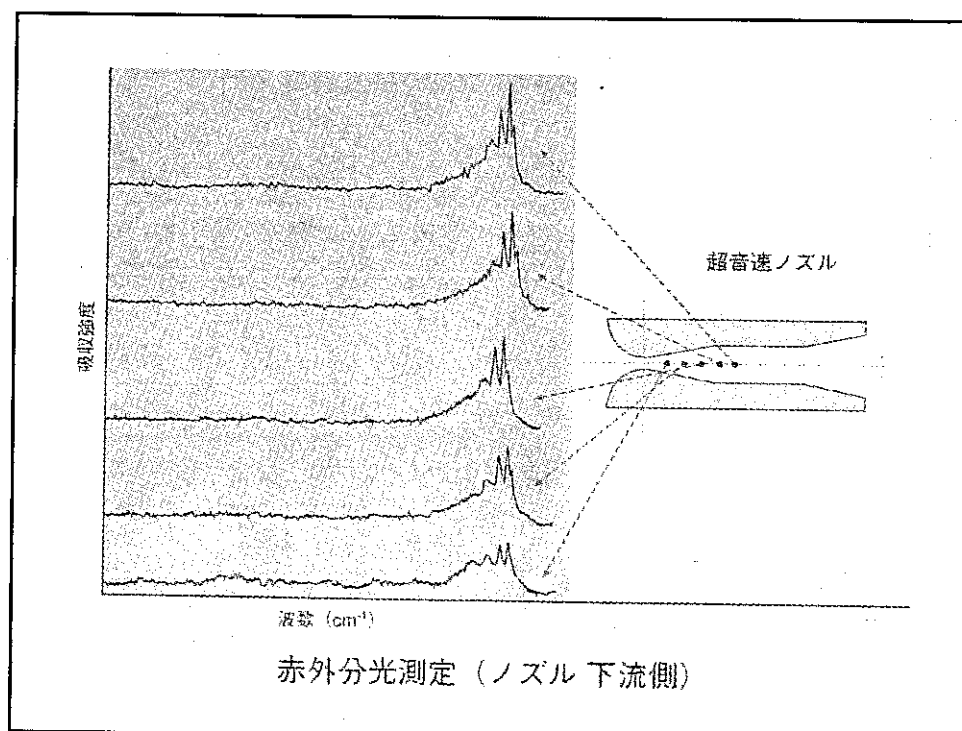
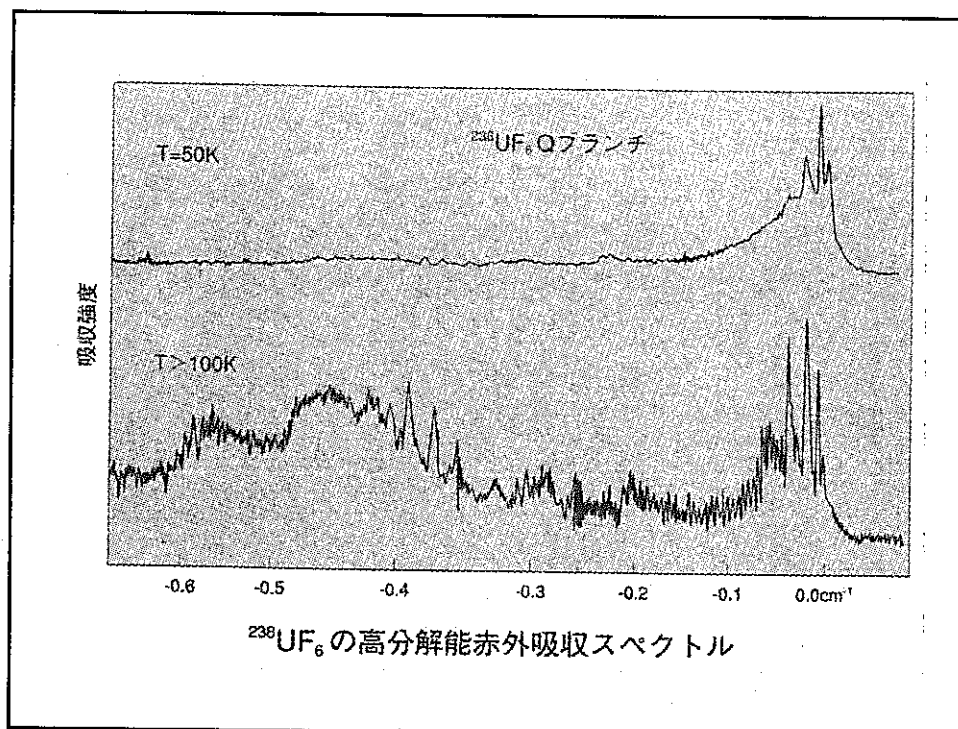


- ・赤外半導体レーザーを用いた分光測定
- ・FTIRを用いたクラスター測定

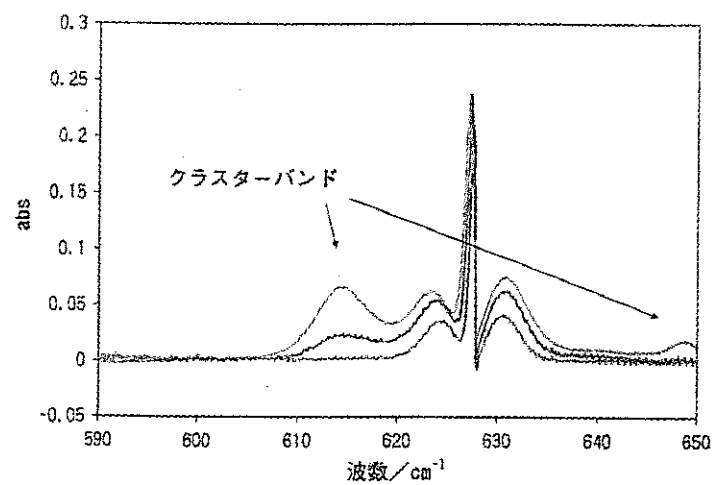
流動状態の評価



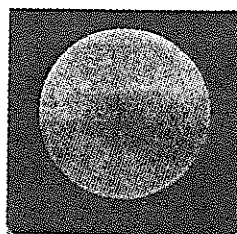
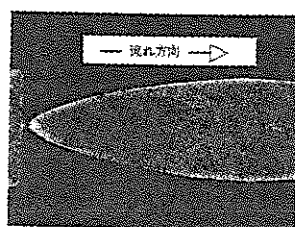
流れの可視化
・シュリーレン



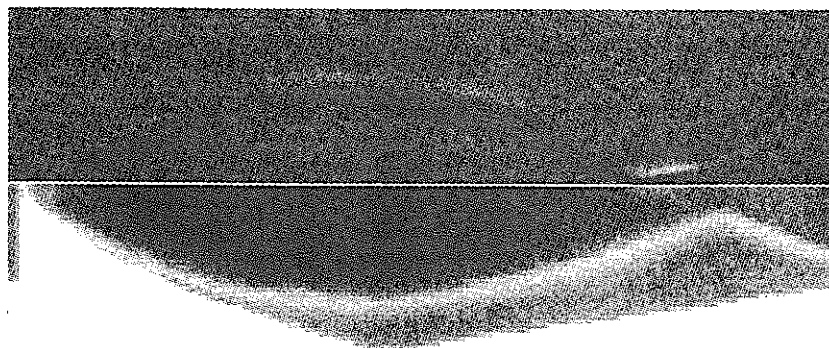
クラスター測定技術



カラーシュリーレン法

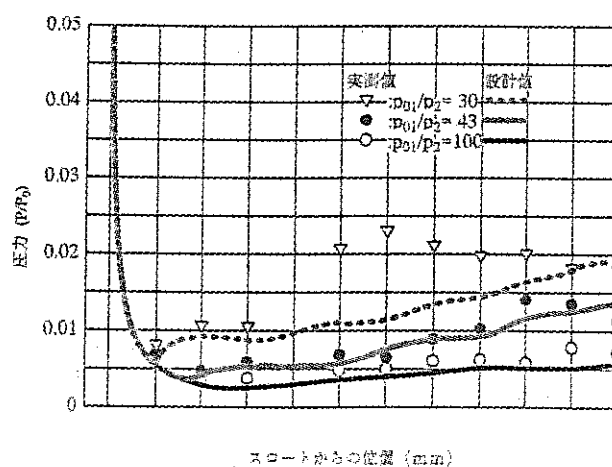


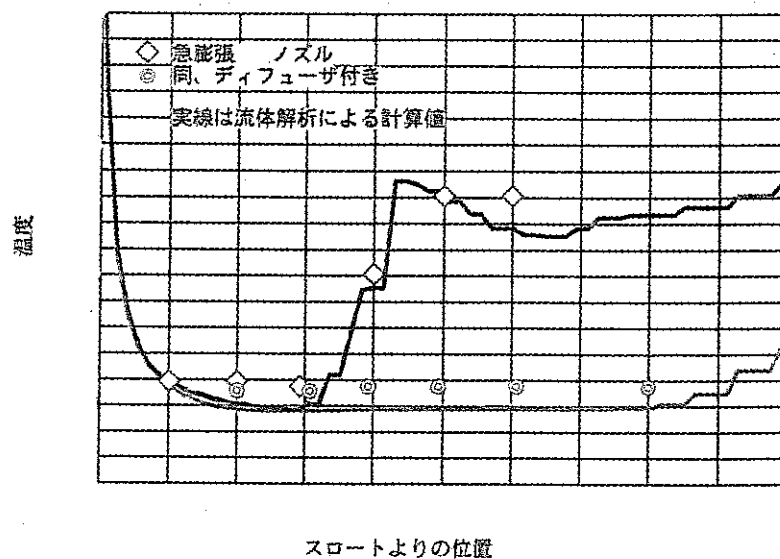
共焦点レンズを用いた密度分布方向参照画像



シュリーレン法による可視化結果と
対応する数値解析結果の比較

実験値と計算値の比較（圧力分布）





分離スキームの最適化

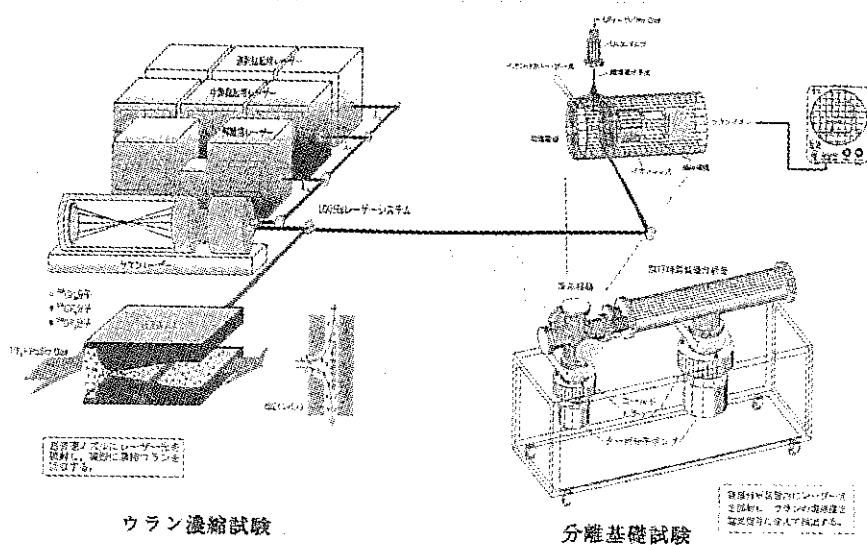
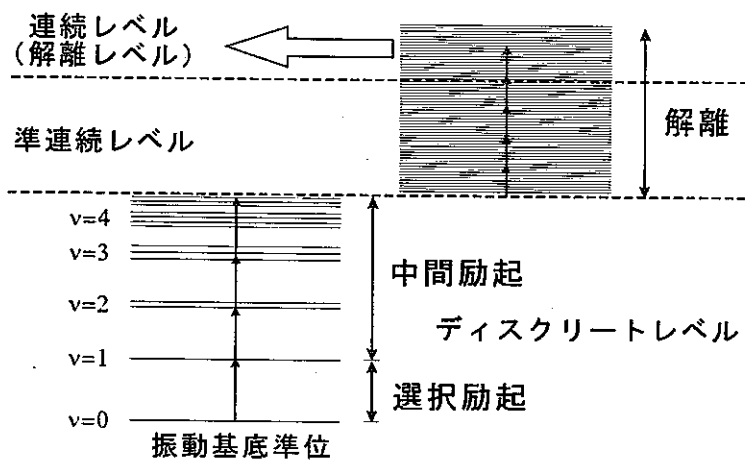
最適化の方向性(課題)

レーザー光フルエンス → 低いほど分離係数は高いが反応生成量は少なくなる。

レーザー照射波長の数 → 数が多いほど選択性は向上するが、設備コストが増える。

できるだけ低いフルエンス、少ない波長数で目標の分離係数を達成する。

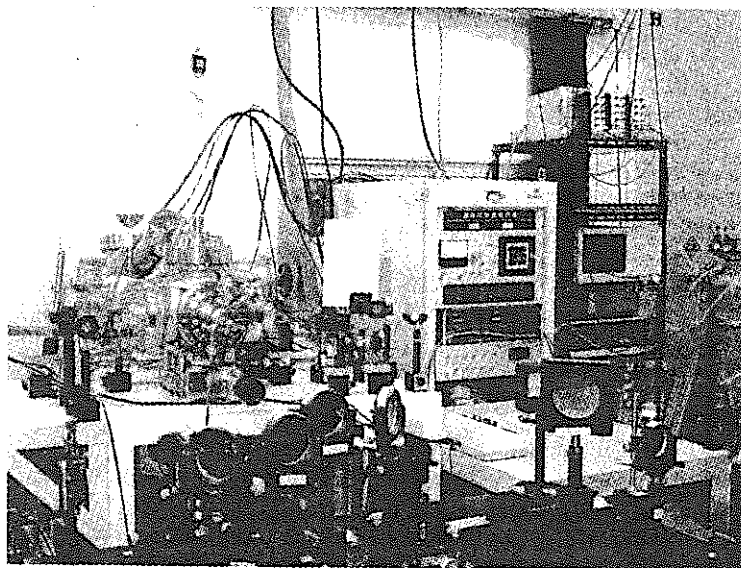
振動励起レベルの構造

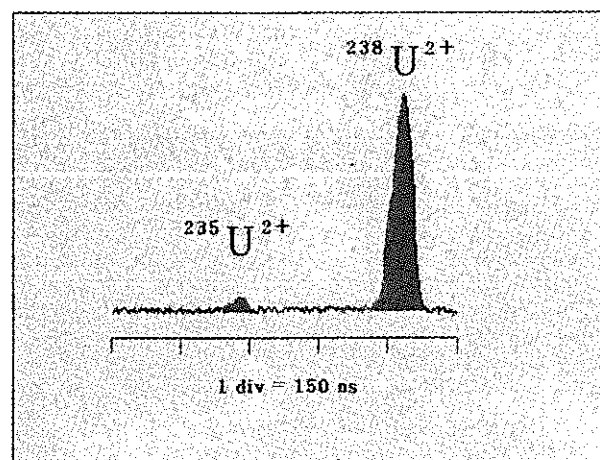
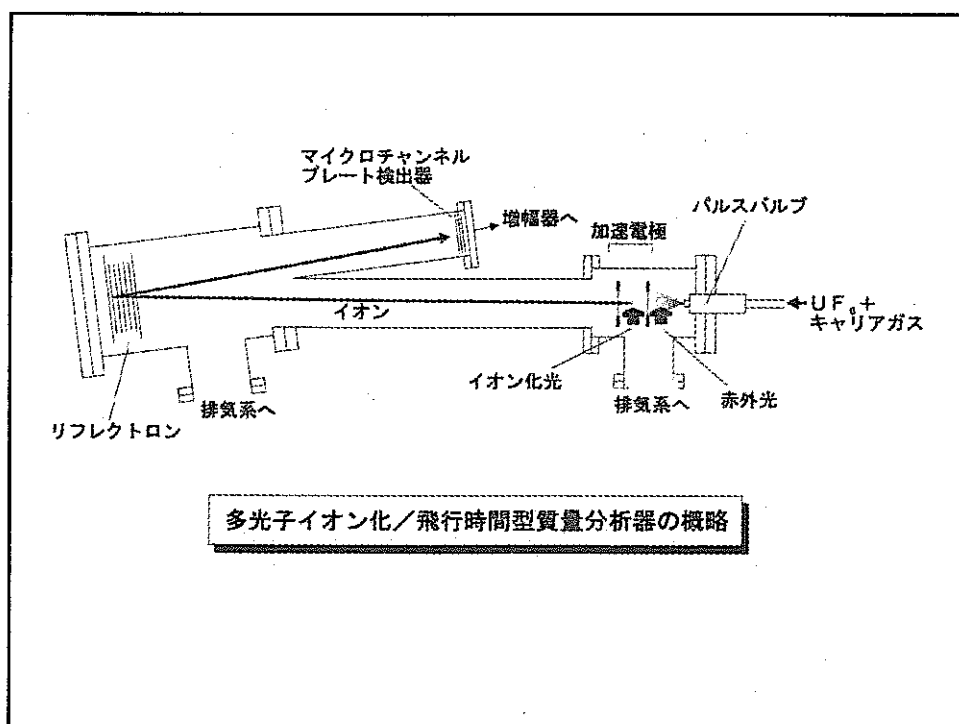


分離基礎試験

分子線と多光子イオン光/飛行時間型
質量分析計を用いたパラメータ試験

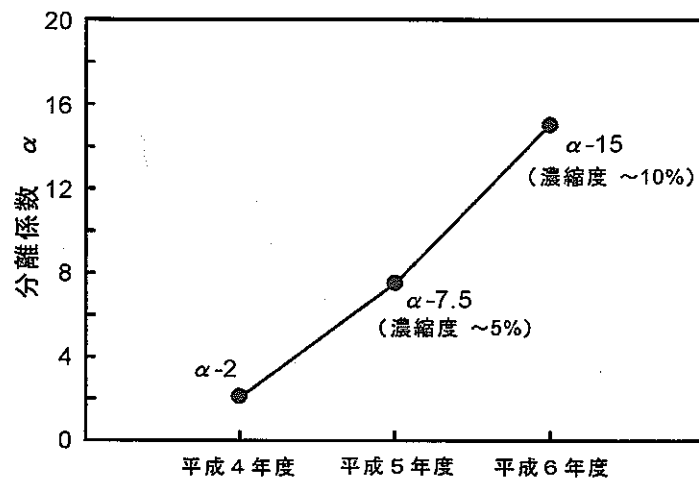
- ・ 波長
- ・ 波長数
- ・ 線幅
- ・ エネルギー強度
- ・ 光パルスディレー
- ・ パルス形状
- ・ 偏光
- ・ 温度



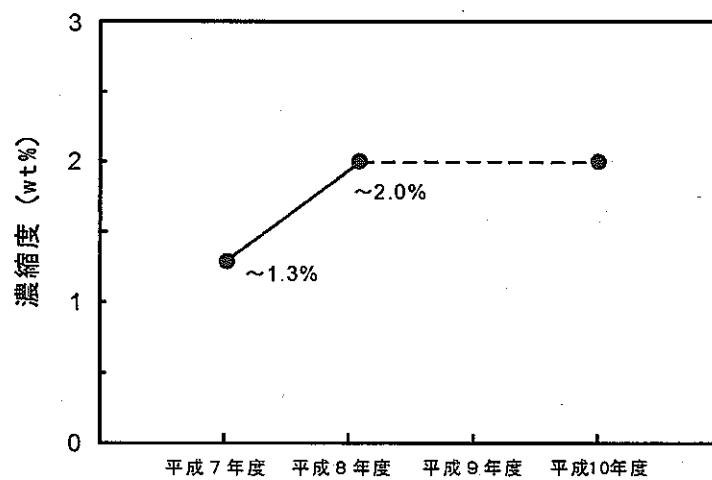


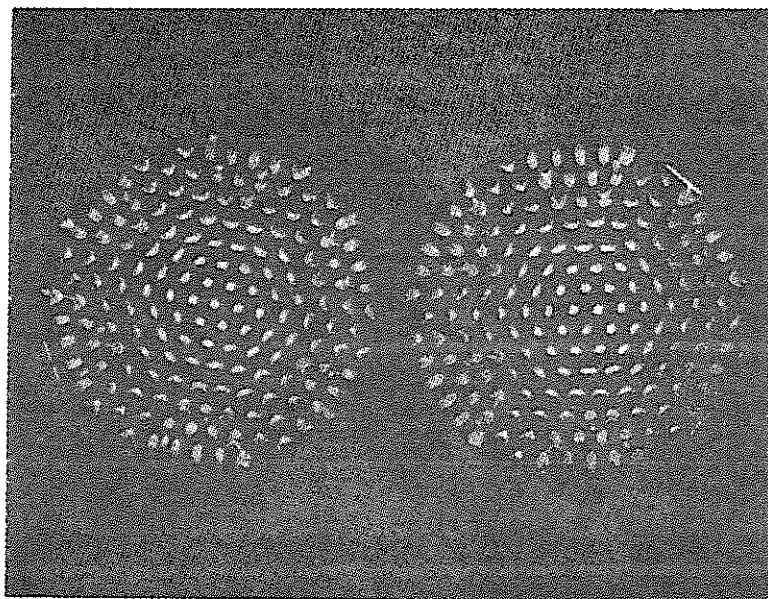
UF₆のTOFマススペクトル

分離基礎試験結果の推移



ウラン濃縮試験結果の推移





Enriched UF₆ powder recovered by the multiple nozzle impactor

研究開発成果

工学試験について

1. 超音速ノズルの評価及び設計技術確立し、最適化を達成した。
2. 原理的に約10%の濃縮が可能であることを確認した。
工学条件下では、最大濃縮度約2%を達成した。

分離性能向上のための課題

分離係数及び製品量をともに向上させるためには



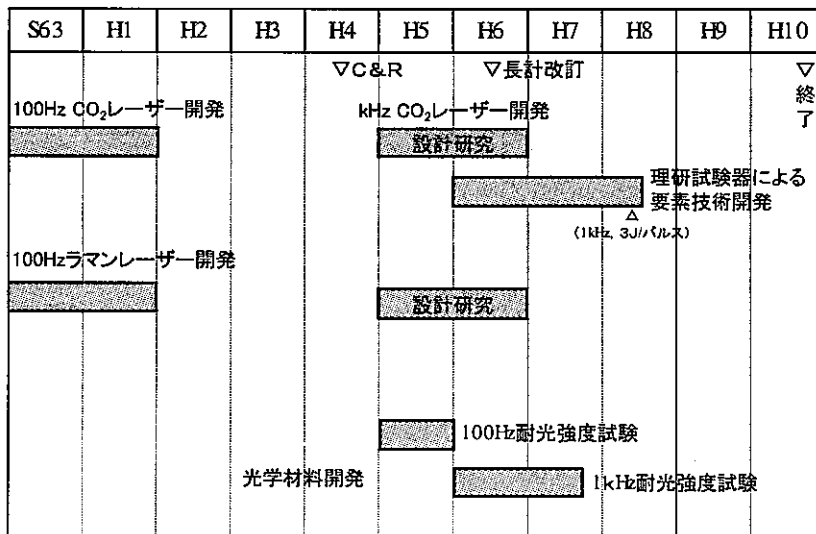
照射波長等さらなる分離スキームの最適化

研究開発成果(2) - kHz級レーザー開発 -

kHz級レーザーシステムの開発項目

- 炭酸ガスレーザー開発 (パワーオシレータ)
 - 繰り返し数 1kHz程度
 - パルスエネルギー 3~4J/パルス
 - パルス幅 100~200ns
 - 単一モード
- ラマンレーザー開発 (2段階方式)
 - 繰り返し数 1kHz程度
 - 出力 500mJ/パルス
- 光学材料開発
 - 寿命 $10^8 \sim 10^9$ ショット

レーザー開発スケジュール



1kHz炭酸ガスレーザーの開発

高繰り返し要素技術開発

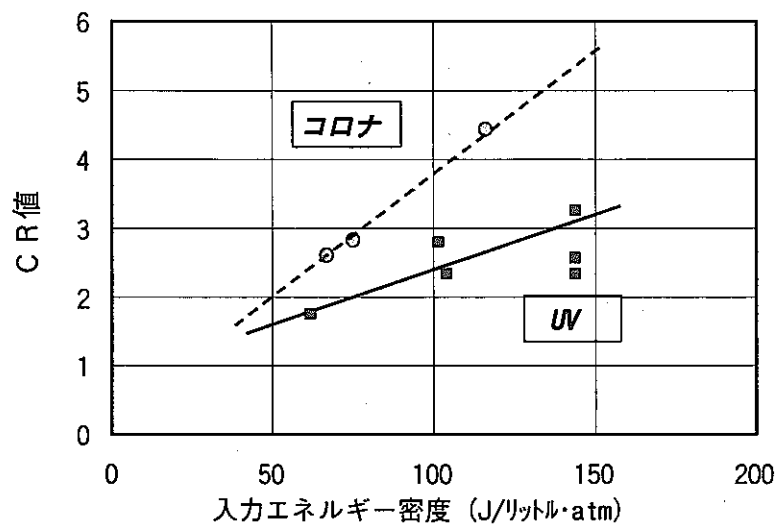
- ・ 固体電源
(100Hzレーザー技術の応用)
- ・ UV予備電離方式
(国産技術によるkHz動作)
- ・ 音響波減衰器
(風洞・ファンの高効率運転)

UV予備電離方式

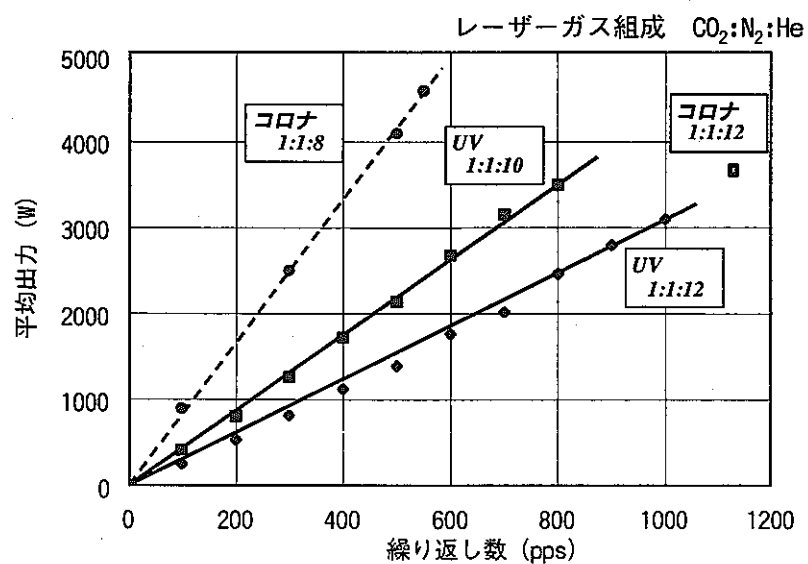
限界CR値と入力エネルギー密度

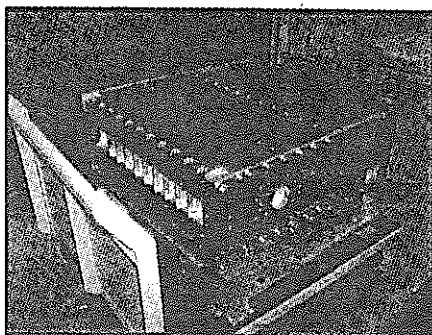
- ・ UV予備電離方式は、高入力密度まで低CR値で動作可能
- ・ 予備電離方式の比較には、最適回路や予備電離エネルギーの検討が更に必要

入力エネルギーとCR値の関係

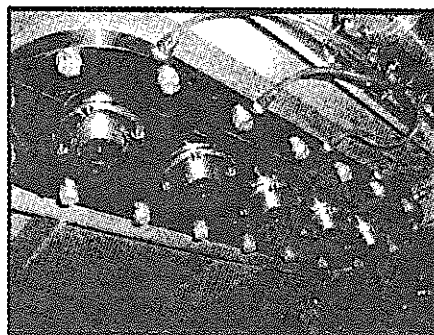


出力特性試験結果





放電電極全景

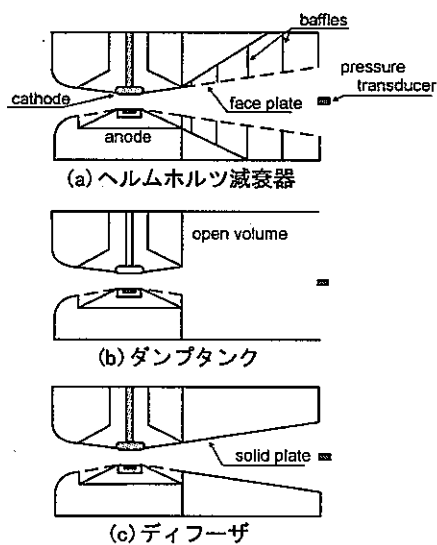


高圧導入端子取付部

kHz級レーザー用UV予備電離式電極

音響波減衰器の比較試験

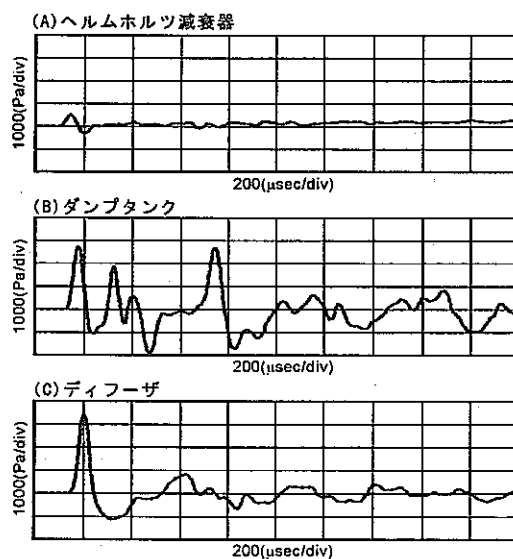
- ・ kHz動作時の安定運転
- ・ 放電後の音響波減衰
 - ヘルムホルツ減衰器
 - * 小孔付き側壁部空間
 - * 流路抵抗が少ない
 - ダンプタンク減衰器
 - * 音響インピーダンス不整合
 - * 淀み流部の発生



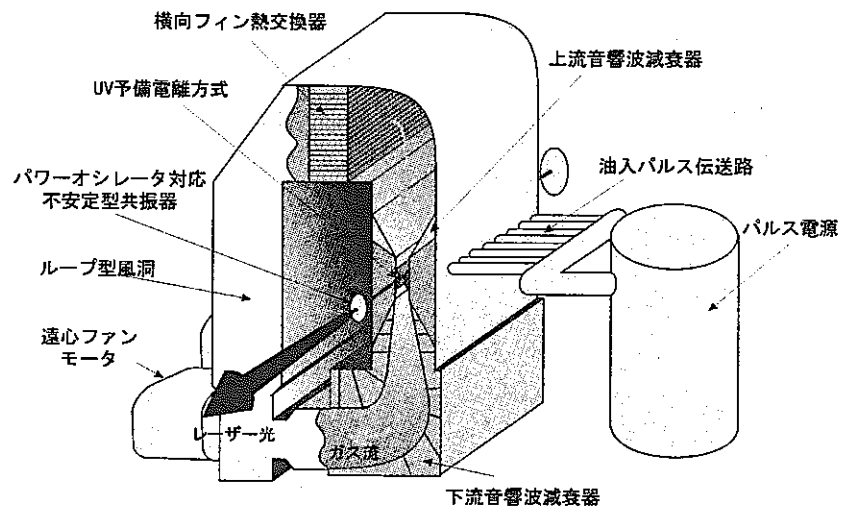
音響波減衰器の実験結果

- ・ 放電部の許容密度擾乱
 - * $\Delta \rho / \rho < 10^{-3}$
- ・ ヘルムホルツ減衰器
 - * 高性能減衰特性
- ・ ダンプタンク減衰器
 - * 大きな反射波の残留

衝撃波の時間推移



kHz炭酸ガスレーザー概念図



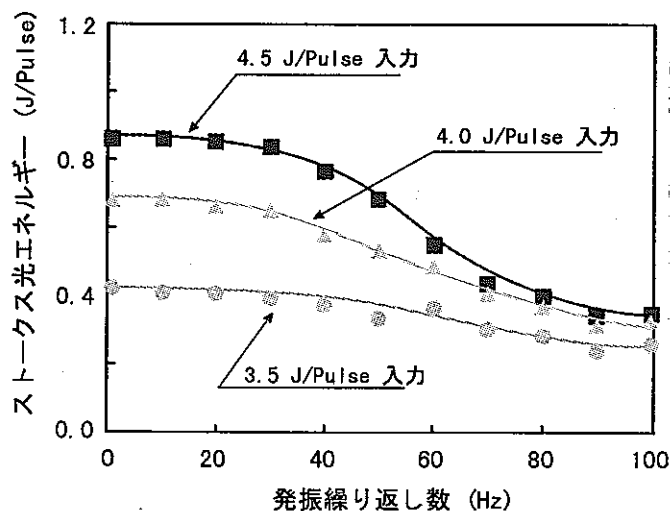
1kHzラマンレーザーの開発項目

- ・2段階ラマンレーザー
 - 直線型飽和変換セル
 - 低温ガスフロー技術
- ・マルチパス設計検討
 - 炭酸ガスレーザーパルス条件
 - 飽和変換領域パス数
 - パルスエネルギー 500mJ

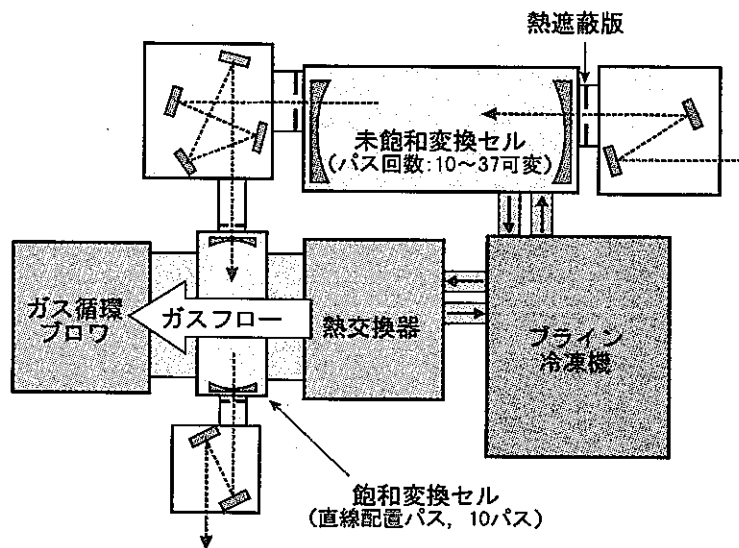
1kHz ラマンレーザー開発の課題

- ・ 出力エネルギーの繰り返し数の増加に伴う出力エネルギーの低下
- ・ エネルギー低下原因
光子の散乱による媒質の温度上昇
- ・ 対 策
ラマン媒質のガスフロー冷却

ストークス光出力エネルギーの 発振繰り返し数に対する依存性

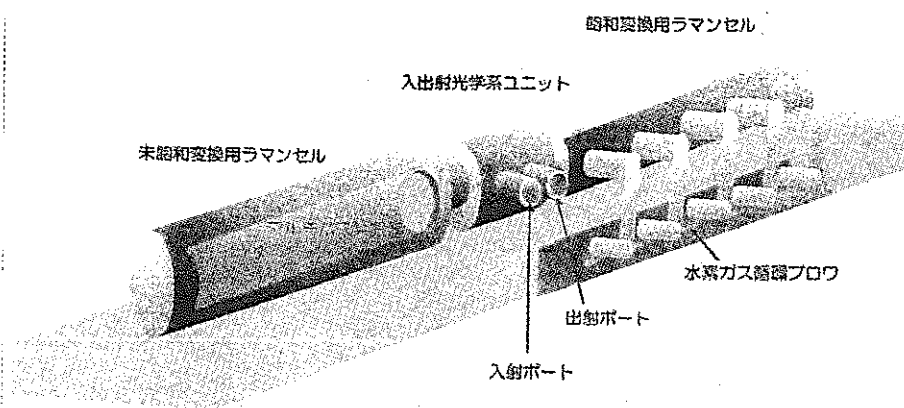


2 段階ラマンレーザーの概念図



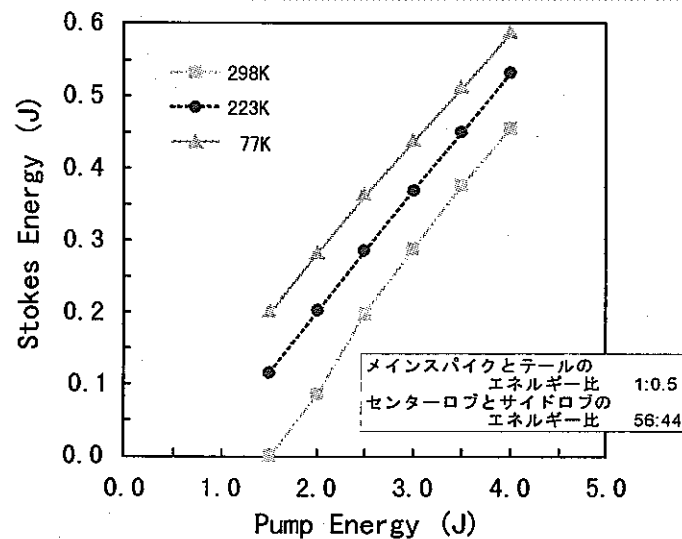
kHz級パラ水素ラマンレーザー概念図

—— 二段階変換ラマンレーザー ——



kHzラマンレーザーの設計計算

～kHz炭酸ガスレーザーパルス条件～



光学材料の開発

目標仕様

照射フルエンス $2\text{J}/\text{cm}^2$
 繰り返し数 1kHz以上
 パルス幅 100～200ns

パルス寿命

総ショット数 $10^8 \sim 10^9$ ショット以上

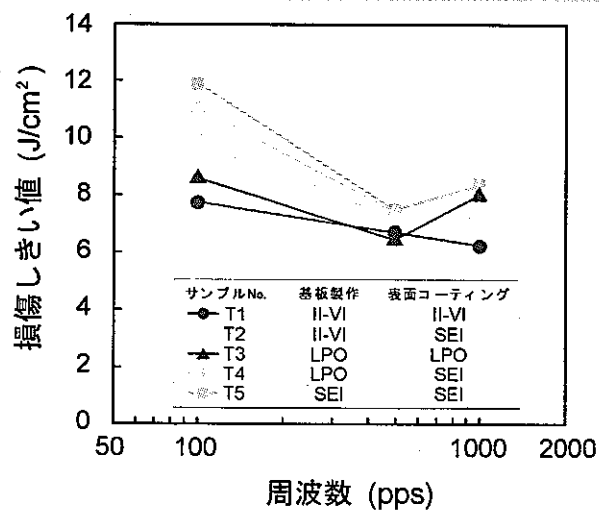
試験項目

耐光強度試験、寿命試験

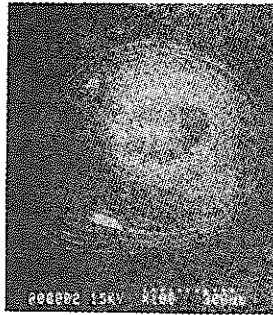
光学部品試験装置概略

- ・ 清浄条件下
- ・ 耐光強度試験
 - 無反射コート (AR)
 - 部分反射コート (PR)
 - 外国製品と国内製品
- ・ 寿命試験
 - 溶融破壊理論により寿命推定

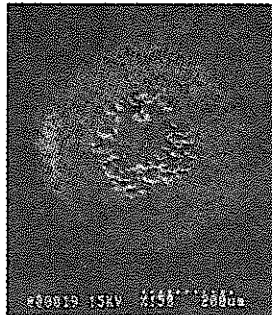
光学部品耐光強度の 繰り返し数依存性



試験サンプルの溶融破壊の例



(A-1) 中心部で膜が溶融し、
周辺部で膜の亀裂を伴
った損傷

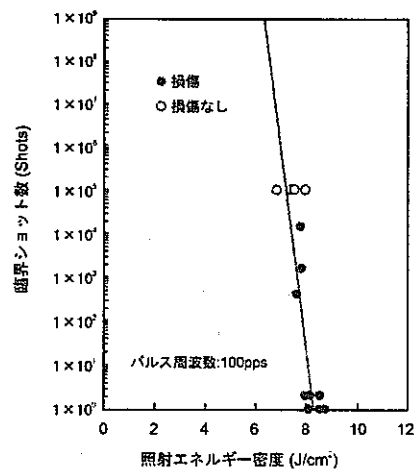


(A-2) 中心部で膜及び基板が
溶融した損傷



(A-3) 中心部で膜が溶融し、
周辺部で膜の剥離を伴
った損傷

試験サンプルの寿命曲線



研究開発成果

1kHzレーザー開発について

1. 1kHz炭酸ガスレーザー要素試験において、1kHz、3J/パルスを達成。
2. 1kHzラマンレーザー設計研究を終了した。
2段階ラマンレーザーシステムの構築
3. 環境条件を整えれば、市販の光学材料で1kHzの繰り返しで十分使用できることを確認。

研究開発成果(3) － プラント設計研究 －

プラント設計研究

1. 実用プラントの概念設計

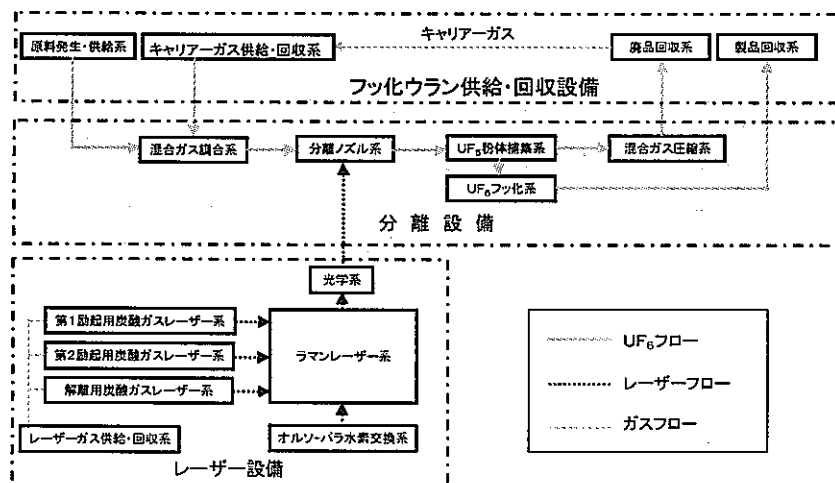
設計条件

- ・ 分離作業量：1,500tSWU/y
- ・ 製品濃縮度：5wt%
- ・ 廃品濃縮度：0.25wt%
- ・ レーザー単機繰り返し数：2.5kHz

2. 経済性評価

建設費、運転費、電力消費量、役務費の算出

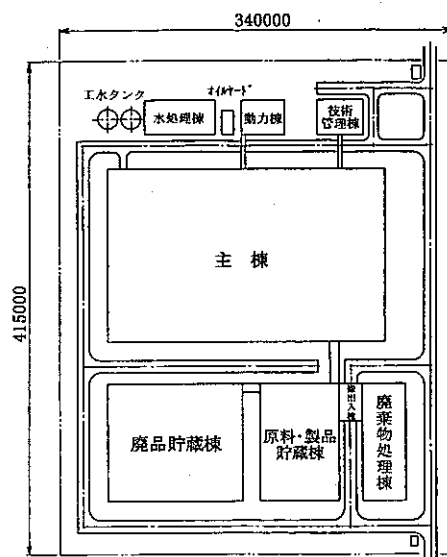
分離, レーザーシステムの概念図

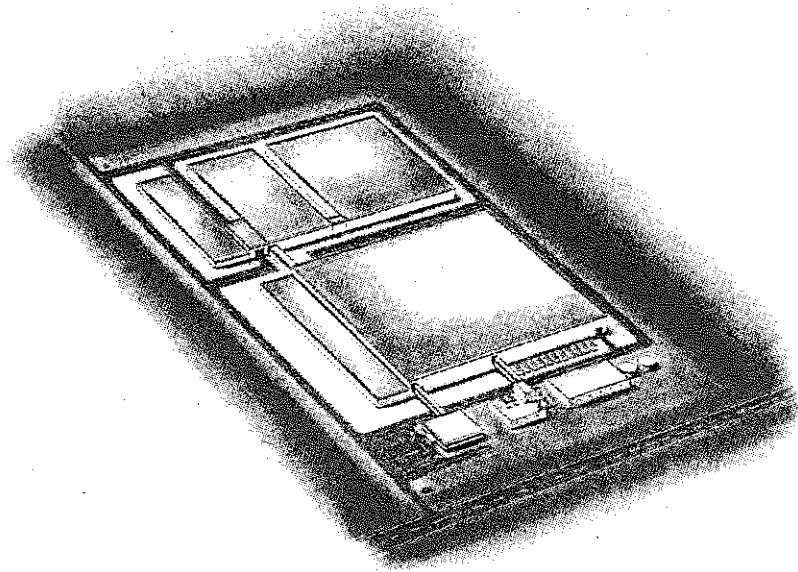


設計結果

- ノズル反応器
ノズル幅：約1m
ノズル台数：8台（約190tswu/台・y）
- レーザー設備
チェーン数：8チェーン（19.1kHz）
（252台）
- 建 屋
主棟 232m×140m
全施設 340m×415m

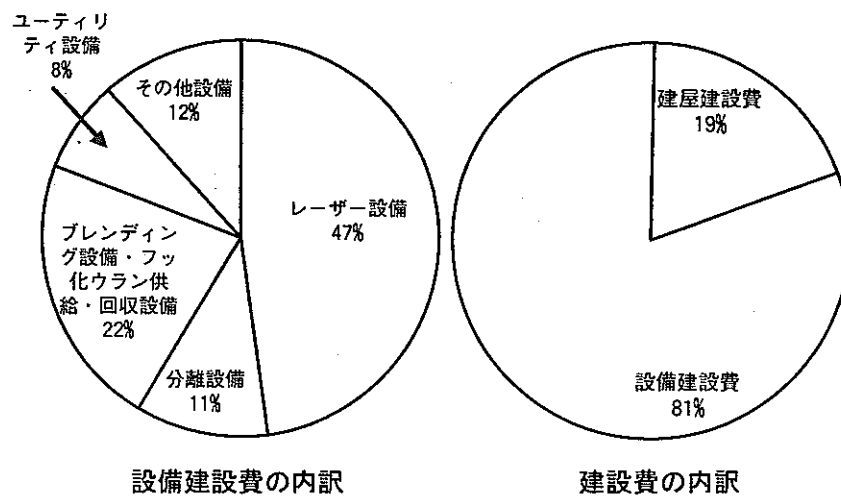
建屋配置図



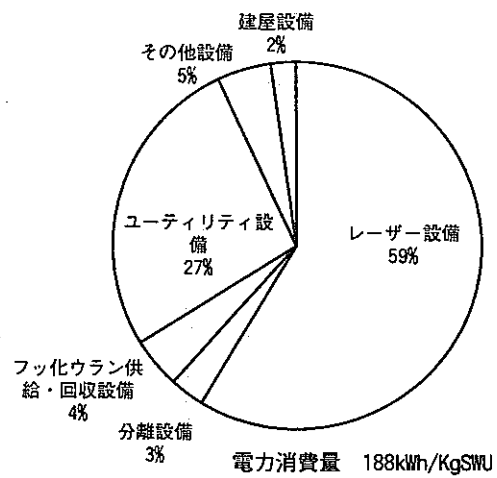


分子レーザー法ウラン濃縮 プラント予想図

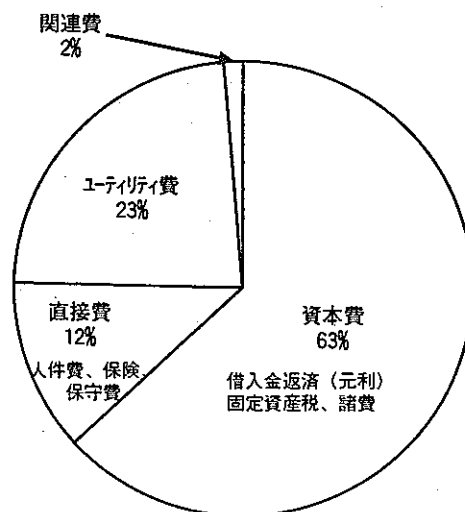
建設コストの内訳



電力消費の内訳



濃縮役務原価の内訳



研究開発成果

プラント設計研究について

濃縮役務コスト評価例

自己資金 建設費の10%

金 利 2.5%

濃縮役務コスト

8,600～10,800(円/kgSWU)

10,000円/kgSWU程度の役務費達成の可能性を示した。

研究開発成果のまとめ

1. 工 学 試 験

- ・超音速ノズルについて、実用化のための重要技術である特性評価技術及び設計解析技術を確立し、最適化を達成した。
- ・分離性能については、ウラン濃縮試験では最大濃縮度約2%で目標とする3%に到達できなかったが、分離基礎試験において原理的には約10%の濃縮が可能であることを確認でき、更なる分離スキームの最適化により、実用化目標である5%を実現できる可能性を示した。

研究開発成果のまとめ（2）

2. kHz級レーザー開発

- ・繰り返し数1kHzで分離に必要なパルスエネルギーを供給できるレーザーシステムの設計・製作に進める開発段階に達しており、技術的な見通しが得られた。

研究開発成果のまとめ（3）

3. プラント設計研究

- ・今後、現状の課題が解決されるとの想定のもとに15,000tSWU/yの実用化プラントの経済評価を実施したところ、濃縮役務コスト8,600～10,800円/kgSWUとの評価結果が得られ、現状の国際価格（120～130ドル/kgSWU）を十分下回る可能性を示した。

応用研究

1. 炭素同位体分離技術開発

^{13}C 、 ^{14}C のパルス炭酸ガスレーザーを用いた同位体分離特性についてデータを取得するとともに高い分離係数（C13：約1500、C14：約1700）を達成した。

2. レーザー除染技術開発

パルス炭酸ガスレーザー光によるアブレーションを利用して、ウランによって汚染された金属表面の除染試験を行い、除染係数約200を達成した。

成果公表等

●国内学会発表	:	39件
●国際学会発表	:	13件
●学会投稿論文	:	24件
●工業所有権等申請	:	18件
●社内資料	:	258件

波及効果

超音速ノズル
開発



・ 低圧超音速流評価及び解析
技術の向上

レーザー開発



・ マーキング用パルス炭酸ガスレーザーとして製品化
・ 加工機用炭酸ガスレーザー
光学部品の品質向上

応 用 研 究



・ ^{13}C 、 ^{14}C 同位体分離技術
・ レーザー除染

参 考 資 料 5

分子レーザー法ウラン濃縮技術開発 自己評価書

本資料は、研究開発実施担当者の自己評価書であり、課題評価委員会の審議の参考として提出したものである。

分子レーザー法ウラン濃縮技術開発 自己評価書

平成 11 年 9 月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

分子レーザー法ウラン濃縮技術開発 自己評価書

1. 研究開発の目的・意義

ウラン濃縮の事業化の目的は、平成4年8月に発表された原子力委員会ウラン濃縮懇談会報告書（以下「濃縮懇報告書」と言う。）に示されているように、「濃縮役務を全て海外に依存することに伴い、プルトニウムを含む核燃料サイクル計画の推進に役務供給国から予測せぬ制約がかかることをできるだけ避け、併せて自らの技術の活用により、濃縮ウランの一層の安定供給を実現する」ことであり、核燃料サイクル全体の自主性の確保により、我が国のエネルギーセキュリティを高めるもので、大きな意義がある。

このため、我が国は、自主技術開発により遠心分離法を実用化したが、価格競争力は低く、国際競争力のある濃縮技術の開発が課題であった。

また、当時のウラン濃縮技術開発の状況は、米国、フランス、英国、ドイツ、南アフリカ共和国の商業濃縮役務供給国が、大幅な濃縮役務価格の低減化が図れる可能性がある次世代の濃縮技術として、原子レーザー法または分子レーザー法の研究開発を積極的に展開している時期であり、我が国としても、将来の国際競争力向上のため、国の政策として第一期研究開発に引き続いてレーザー濃縮技術開発の研究開発を着実に進める必要があった。

このように、国のプロジェクトとして実施されたもので目的・意義は明確であり、国内外の状況を的確に反映した研究開発継続の決定であったと考える。

2. 研究開発目標の設定

分離性能の向上については、超音速ノズルの性能および分離特性に影響を及ぼす種々のパラメータの影響度を把握して、実用化を念頭において最適化目標を定めた。レーザー開発についても、第一期研究開発での研究成果（理化学研究所での研究開発成果を含めて）をもとに、実用化段階である kHz 級の繰り返し可能なレーザーシステムに必要な技術を、炭酸ガスレーザー、ラマンレーザー、光学

材料の各々について目標を定めた。さらには、実用化プラントの概念設計、経済性評価を目標に定めた。

これらの目標は、濃縮懇報告書に示されている「技術の可能性を見極めるため」に適切に応えたものであり、各課題について設定された具体的数値についても妥当なものとする。

また、ウラン関連事業の整理縮小にともなう予算状況の変化に対応して適宜目標の再構築を行うとともに、最新の技術を反映して、個別技術の開発目標の見直しを行った。

3. 研究開発計画

分離性能の向上については、実用化のための課題を摘出して、必要な要素技術を積み上げ、効率的に試験を進めるよう計画を定めた。

レーザー開発については、十分な設計研究のもとに要素技術の開発試験を行うよう計画を定めた。

開発項目についても、具体的に策定し、年度毎の成果及び年度計画については、外部の専門家から構成された分子レーザー法ウラン濃縮技術委員会へ報告し、指導助言を受けるとともに一方の研究開発の当事者である理化学研究所との情報交換を適宜行い、開発計画の見直しに反映した。このように、計画を柔軟に見直し、適宜、再構築を行った。

4. 研究開発体制

理化学研究所と研究協力協定を結び、人事交流、設備の相互利用等を行い研究開発の推進が図られた。この研究協力は、基礎研究の理化学研究所とプロジェクト開発の動燃のそれぞれの特徴を最大限に発揮し得たものと言える。

また、分子レーザーウラン濃縮技術委員会による指導、助言を受けながら研究開発を進めた。

機器開発およびエンジニアリングについては、国内の実績ある企業（東芝、日立、三菱重工、三菱電気、三菱マテリアル、日揮、住友電工）の協力を受けるとともに、理論解析、先端測定技術、応用研究等については、大学、研究機関から

も多くの協力を得た。

分子レーザー法の開発には、量子化学、分子分光学、流体力学、レーザー工学等の専門知識を持った人材が必要であり、積極的な人材の確保と、国内外での大学、研究機関においての人材育成を図ったことも研究開発の促進に大きく貢献したと考える。

このように、関係者間の連携を常に保ちながら研究開発を進め得たことより、実施体制は妥当なものと考えている。

5. 研究開発成果

(1) 成果の内容について

超音速ノズルの最適化については、最新のレーザー分光技術、可視化技術を応用して超音速ノズルの高度な流動特性評価技術確立した。特に、低圧での流れの鮮明なカラーシュリーレンによる可視化は世界で初めてである。また、超音速ノズル流動解析技術確立し、流動特性評価技術と併用して超音速ノズルの最適化を達成し、実用化に向けて必要とする基盤技術の開発を成し得たことから、目標を達成できたと考える。

分離スキームの最適化については、最新の多光子イオン化/飛行時間型質量分析法を応用した分離特性試験装置を開発し、分離基礎試験において、原理的に約 10%の濃縮（分離係数約 15）が可能であることを確認した。このように高い分離係数が得られることは専門家でさえ予想していなかったことであり、大きな成果であると考え。ウラン濃縮試験では、最大濃縮度は約 2%で目標値の 3%は未達成であるが、分離基礎試験から得られたデータよりさらなる多波長化等により 3%以上の濃縮度を達成できる見通しは得られたと考えられることから、ほぼ目標を達成できたと考える。

なお、アスファルト固化処理施設火災爆発事故に端を発した一連のトラブルにより約 1 年 4 ヶ月にわたる試験施設運転停止があり、多くの貴重な試験が実施できずに開発が終了してしまったことはまことに残念なことである。

1kHz パルス炭酸ガスレーザーの開発については、要素技術についての開発試験を行い設計・製作に必要なデータを取得するとともに要素試験装置を用い

て、瞬間的ではあるが、繰り返し数 1kHz、パルスエネルギー約 3J を達成し、技術的見通しが得られた。

予算等の関係で試験機の製作・発振試験はできなかったが、1kHz パルス炭酸ガスレーザーの製作が十分可能となったことから、当初の目標を達成できたと考える。

1kHz ラマンレーザー開発については、高繰り返しに対応した効率的な冷却システムとして、2 段階ラマンセル方式を考案し、解析計算により有効性を確認するとともに概念設計を実施した。

予算等の関係で試験機の製作・ラマン変換試験ができなかったが、第一期研究開発で開発、検証された解析コードを用いて 2 段階ラマンセル方式の有効性を確認できたことから、当初の目標を達成できたと考える。

高繰り返し用光学材料の開発については、耐光強度試験等を実施した結果、現状技術の延長で対応できる見通しが得られ、目標を達成できたと考える。

プラント設計研究については、1500tSWU/年の濃縮役務能力を有する商業プラントの概念設計および経済性評価を実施して、課題の摘出を行い、目標を達成した。

応用研究については、 ^{13}C および ^{14}C のレーザー同位体分離試験を行い、高い分離係数を達成するとともに、レーザーアブレーション効果を利用したウランの除染効果を実証する等の成果を得た。

(2) 実用化との関係について

これまでの研究開発により分子レーザー法は、技術的にも経済性の観点からも、実用化の可能性があることを確認できたと考える。

特に、超音速ノズルおよびパルス炭酸ガスレーザーについては、ほぼ実用化の段階に到達できたと考える。

また、実用化のための基盤技術としてさらに研究開発を継続する必要があるものとして、本研究開発で残された課題としては、

- ・さらなる多波長化を含めた分離スキームの最適化
- ・試験機を用いたkHz レーザーシステムの連続運転性能の評価

をあげているほか、本研究開発で実施しなかったプロセス機器の開発（微粒子の製品 UF₅ 大量捕集装置の開発、大容量圧縮機の開発等）もあげており、課題の整理も妥当と考える。

なお、さらなる濃縮役務コスト低減化のためのレーザー設備に対するコスト低減化策の一つとして、現在加工機として一般産業界に普及している連続発振の炭酸ガスレーザーのパルス化による 10 kHz 以上の高繰り返し・高出力化等の新しい技術開発も提言できた。

近年、半導体レーザーの技術革新には目覚ましいものがあり、将来さらなるレーザー技術のブレークスルーを生み出す可能性もあり、実用化のための基盤研究開発をさらに継続し、将来に備えることが望ましいと考える。

なお、今後実用化に向けた研究開発に進める場合には、濃縮事業者の参画が必要である。

(3) 成果の普及、公開について

機微情報管理のため、成果の公開が制限されている中で、国内外での発表 52 件、投稿論文等 24 件と、積極的に成果の公開に取り組んできたと考える。また、2 名の論文博士も誕生しており、本研究開発を基に人材の育成も図られた。

特許については、基礎試験を主体としたことと、機微情報管理の制限を受けたことを考慮すれば、18 件の取得数は妥当と考える。

波及効果については、低圧流体の可視化技術、流動解析技術など今後利用される可能性を秘めていると考える。

6. 総合評価

本研究開発では、個々の要素技術開発を着実に積み上げ、超音速ノズルについては、ほぼ実用化レベルまで高めることができ、分離性能については、原理的に約 10% の濃縮が可能であることを確認し、レーザー開発については、実用化に必要な kHz 級の繰り返しの技術的見通が得られた。また、経済性評価では、現

状の濃縮役務国際価格を十分下回る可能性を示した。これらの結果から、「技術の可能性を見極める」という初期の目的に対して満足する成果が得られたものとする。

分子レーザー法の次のステップは、実用化のために実証を進めることである。本研究開発の成果は、そのための判断材料を提供できるものとする。

研究開発の実施に当たっては、理化学研究所との研究協力が有効に機能し、人物の両面にわたって効率的に研究開発が実施でき大きな成果をあげることができたのは、このようなプロジェクト的研究開発では初めてのことであろう。

残された今後の大きな課題としては、分離スキームをさらに最適化して、実用化を見通せるある一定の水準（5%の濃縮）まで技術を高めることと、大幅なコストダウンを達成するためのレーザー技術開発があげられる。

レーザー開発については、他の分野において技術革新が期待できるが、分離技術については機微情報管理の観点からも特定の実施機関による開発に限定せざるをえない。このためには、他の研究機関に技術（設備も含めて）を移転し、研究開発を継続することが望ましいとする。

分子レーザー法ウラン濃縮技術開発は、これまで我が国のレーザー同位体分離研究推進の一翼をになってきており、研究開発の終結は、基礎研究衰退につながる可能性もある。レーザー同位体分離技術は、同位体機能材料など将来のブレークスルーを生むための重要な基盤技術でもあることから、これらへの考慮も必要とする。

参 考 資 料 6

課題評価委員の評価意見等に関する補足説明

課題評価委員の評価意見等に関する補足説明

各評価委員からの評価意見等の中で示された、疑問点、被評価者側の説明不足の項目等について、以下に補足説明を行う。

1. 実用化までにどんな課題が残されていて、それを達成するためには技術的側面だけではなく、人、物、金的にもどんな規模となるかを残しておくことが必要と考える。

[説明] 本研究開発では、レーザーの波長、光強度等を調整することで濃縮度を10%まで上げられることは確認した。この条件では、冷却温度が低く原料の分子密度を低く抑えられるため、製品量生成率が少なすぎて実用化は困難であることがわかった。

そこで、製品がある程度生成、回収できる条件で試験をしたところ、2%の濃縮度が得られた。現状の3波長のレーザー光を用いた濃縮では、この辺が限界であることを確認した。

このため、濃縮度と製品量をさらに向上させるためには、これまでの試験結果から、照射する波長の数を増やすことが適当であり、これによって実用化目標となる濃縮度3~5%、原料の10%以上を製品として分離できる条件を確立することが一番の課題と考える。

その他、実用化までのに必要な主な技術開発は以下のとおりである。

- ① 超音速ノズル：[基盤技術]・実用化規模の大型ノズルでの流動特性確認
・ノズル窓へのフッ化ウラン化合物の付着対策
[高度化技術]・極低温高分子密度ノズル開発
- ② 分離スキーム：[基盤技術]・四波長照射による実用化分離条件の確立
- ③ レーザー：[基盤技術]・炭酸ガスレーザーの1kHz長時間安定発振技術
・2段階ラマンセルの1kHz長時間安定変換技術
・高繰り返しレーザービーム結合技術
[高度化技術]・連続発振炭酸ガスレーザーのパルス化による
10kHz炭酸ガスレーザー開発
- ④ プロセス機器：[基盤技術]・大流量軸流圧縮機開発
・大容量製品UF5捕集器開発

分子レーザー法の技術開発を今後継続するとした場合、以下の3ステップによる開発が考えられる。

- ・ステップ1：最優先課題である②分離スキームの基盤技術と①超音速ノズルの基盤技術及び高度化技術の開発を実施する。設備は、現状の設備を一

部改造することで可能。期間5年間で約15億円、人員は10名。

- ・ステップ2：③レーザーの基盤技術、④プロセス機器の基盤技術の開発として、単機の開発、信頼性の確認を行う。施設は現有のものを利用、期間は5年間で約50億円、人員は約15名。
- ・ステップ3：レーザー繰り返しkHzでの、数トンSWU/年規模での濃縮実証化試験を実施するとともに、レーザー繰り返し2.5kHz～10kHzのレーザーの開発を行う。施設を新設し、期間5年間で約200～400億円、人員は約40名。

2. 派生技術としてどんな分野での応用が可能か、そのためのハードルは高いのか、比較的容易なのか。

[説明] 派生技術の応用可能性は以下のとおり。

① 超音速ノズル技術

- ・低圧流体の可視化技術および超音速低圧流体解析技術
一般学術研究及び低圧流体利用機器の設計に直ちに利用可能。

② レーザー技術

- ・kHz級高繰り返しパルス炭酸ガスレーザー
レーザーアブレーション効果を利用して、航空機や船舶の再塗装時のペンキ剥がしに、また、材料表面の放射性物質、有害物質の除去に利用可能。実用化の可能性大。

③ 同位体分離技術

- ・C13のレーザー同位体分離
kHz級高繰り返しパルス炭酸ガスレーザーを用いて、フロン22を原料とし、医療用として有用なC13の商業同位体分離に利用可能。コスト低減化のための技術開発が必要。

3. 基礎研究だけでも大学、理研等で継続する必要があるのか、ないのかサイクル機構としての考え方を記述してほしい。

[説明] 残された大きな課題である、分離性能の向上については、実用化を見通せるある一定の水準（濃縮度5%以上、カット10%以上）まで基盤技術開発を継続し、将来のレーザー技術の技術革新にともなう経済性の向上に備えるべきである。

また、分子レーザー法ウラン濃縮技術開発は、これまでのレーザー同位体分離研究開発の一翼をになってきており、研究開発の終結は、基礎研究の衰退につながる可能性もある。レーザー同位体分離技術は、同位体機能材料など将来のブレークスルー生

むための基盤技術であり、技術を絶やさないためにも、基盤研究を継続すべきと考える。

4. 原子法グループとの連携や半導体レーザー関連の研究者との連携とその成果の取り込みなども随時行われるべきではなかったのか。遠心法の進歩を見越した当計画の再考等があったのか無かったのか。

[説明] 原子法グループとは、組織も異なり、機微情報であることから、詳細な情報交換等の連携はなかった。

半導体レーザー関連については、調査研究等を実施したが、当面、分子レーザー法用のレーザーとしての適用は期待できないとの結果を得ている。

遠心法の進捗については、組織として同じ部内であり、情報は十分にあり、役務コスト目標等の参考とした。

5. 理研が本プロジェクトで担ったブレークスルー研究の中身と JNC 計画へのフィードバックが不明確である。両者の情報交流が完全ではなかったのではないのか。

[説明] 理研におけるブレークスルー研究は、主に次期の JNC における研究開発に反映するためのものであり、第二期の JNC の研究開発においても、第一期の理研における研究開発成果を反映して研究開発を実施してきた。

また、直ちに実施できそうなものについては導入の検討をおこなったが、予算的な問題（高気圧炭酸ガスレーザーの波長安定化）と、アスファルト固化処理施設火災爆発事故にともなう影響で試験が実施できず、反映できなかった。

理研とは、定期的な情報交換及び人的交流を行い密接な協力のもとに研究開発を進めた。主な協力については、以下のとおり。

① レーザー関係について

第一期研究開発開始にあたって、理研においてレーザー研究開発に従事していた2名の学生を採用し、理研の田代副主任をリーダーとして迎え、100Hz レーザーシステムの設計・製作のための技術開発を実施した。理研においては、さらに進んだkHz 級炭酸ガスレーザーの基礎研究を実施した。また、研修生2名を派遣し、レーザー技術の習得に努めた。（内1名が、博士号を取得）

第二期研究開発においては、理研における研究開発成果を受け、kHz 級レーザー設計研究を、第一期と同様に理研の田代副主任のもとに実施した。kHz 級炭酸ガスレーザーの設計データ取得は、理研の要素試験装置等を用いて実施した。その他、高気圧炭酸ガスレーザーの発振波長幅の狭帯化等で協力を受けた。理研においては、ブレークスルー研究として、高効率を目指した内部変換型ラマンレーザー、新しい選択励起

用レーザーシステムを目指した重水素ラマン変換レーザーシステムの研究開発を実施した。

② 分離プロセス関係について

第一期研究開発においては、理研における基礎試験データに基づき、工学試験装置のプロセス設備の設計・製作を実施した。また、分離試験のレーザー照射条件等について情報開示を受け、工学試験を実施した。研修生としては、4名を派遣し、UF₆の取り扱い等についての技術協力をするとともに分離試験技術等の習得を図った。その他、理研の分離試験試料の同位体分析、製品 UF₅ の物性研究に関する X 線回折分析、X 線光電子分光分析について協力を行った。理研においては、分離基礎試験、UF₅ 物性研究等が行われた。

第二期研究開発においては、分離基礎試験を引き継ぎ系統的試験を実施した。これは、理研における分離試験は、研究開発のためのレーザー設備を利用して実施していたため使用期間が限られること、繰り返しが1Hz 前後と少なく試験時間がかかること等のため動燃が実施することとなった。理研においては、ブレイクスルー研究として、同位体交換反応、製品 UF₅ 粒子の成長方法等に関する研究が行われた。

6. 実用化時に必要とされる数十 kHz 級パルスレーザーの開発について、はっきりと述べられていない。

[説明] レーザーの繰り返し数が kHz 級のレーザーを用いても実用化は十分可能である。プラント設計研究では、レーザーの繰り返し数 2.5 kHz のレーザーを8系列、時間をずらして発振し、特殊な光学系により光を結合することで20 kHz の繰り返しを得ることとしている。

経済的に最適な繰り返し数については、レーザーの台数が数百から数千のオーダーで量産効果があり期待できないことから、繰り返し数を上げ、設置面積および光学系を減らす方が経済性が向上すると考えられる。

そこで、役務コスト低減化のためには、レーザーの性能向上によるコスト低減が必要であり、加工機用の高出力連続発振炭酸ガスレーザーのパルス化による10 kHz 級のレーザーの検討を実施した。基礎試験において、可能性のあることを確認しており、有望な方法と考えている。

7. 困難な課題に対しての外部研究機関の協力を仰いで解決していく努力が必要であったと思われる。

レーザー技術やノズル設計に関して、他の機関等で有用な技術開発があるのかなどの一般的な研究動向の把握が十分であったか否かは判然としない。

[説明] 外部研究機関、メカーへは、予算の許される範囲内で委託研究を行い、課題の解決促進及び技術動向の把握に努めた。その他、関係研究機関の訪問調査及び関係研究者との意見交換等により多くの有益な情報を得た。

分離関係では、ドイツ・ウラニット社の分子法施設訪問調査、米国・ロスアラモス研究所の訪問調査、南アフリカ分子法研究者との意見交換、米国・MIT 研究者との意見交換、東北大学伊藤研究室の卒業生2名の採用等である。

超音速ノズル関係では、東工大三神研究室（流体解析）、東北大流体科学研究室（流れ可視化技術）、三菱重工高砂研究所（流れ可視化技術）、石川島播磨重工業（流れ可視化技術）への委託研究、航空宇宙技術研究所（流体解析）の訪問調査等である。

レーザー関係では、東芝（1kHz 炭酸ガスレーザー設計）、産業創造研究所（赤外固体レーザー調査、連続発振炭酸ガスレーザーパルス化調査）、新日本製鉄（連続発振炭酸ガスレーザーパルス基礎試験）、慶応大学（高繰り返し炭酸ガスレーザー調査研究）への委託研究である。

UF5 捕集技術関係では、埼玉大学（インパクター流動解析）、大阪府立大学（静電捕集法の検討）、広島大学（大量捕集システム検討）への委託研究を行った。

8. 内部において具体的な数字を挙げた定量的な評価が望まれる。

[説明] 評価委員会としての性格はないが、分子レーザー法ウラン濃縮技術委員会において、平成10年8月28日、これまでの開発成果（機微情報を含む）を報告し、最終講評を頂いた。

9. 状況に応じて開発計画の見直しが適切に行われたかについて疑問が残る。

[説明] 分離基礎試験において平成6年度、分離係数約1.5（極低温、低密度での試験。天然ウランを約10%に濃縮できる性能）を達成し、それらの結果をもって平成7年度にウラン濃縮試験を実施したが、濃縮度約1.3%しか得られなかった。ウラン濃縮試験では、工学条件であるため、分離性能に影響を与える可能性のある因子が多く原因を特定できない。このため、再度、分子間衝突が無視できる分離基礎試験に戻り、装置を改造して、ウラン濃縮試験と同じ温度条件を設定できるようにして試験を実施し、分離性能の向上につながる多くのデータを取得するとともに、これらのデータを反映したウラン濃縮試験において濃縮度約2%を達成した。

また、分離性能の向上と、超音速ノズル開発に勢力を集中するため、プロセス機器の設計研究を取りやめている。

上記のように、状況に応じた開発計画の見直しはある程度対応できたと考える。また、平成7年度、社内の研究途中での中期評価を受け、計画の見直しに反映した。

10. 機微情報に属するとの見方から、ほとんどが社内資料に留まっており、公開論文数など十分とは言えない。関係者のさらなる努力を促すとともに、科学的成果として公開できるものはできるだけ発表することが望ましい。

[説明] 情報管理規定に縛られながらも、できる限り情報の公開に努めてきた。汎用技術である低圧力下でのカラーシュリーレン技術については、国際会議で報告している。また、社内資料258件の内、32件を公開資料とした。世界各国とも、濃縮技術についてはほとんど公開しておらず、これらと比較すると、かなりの努力を行ってきたと考える。

11. ウラン濃縮技術の比較及び原子レーザー法ウラン濃縮技術についての概要を説明してほしい。また、国外でのウラン濃縮技術の経済性評価の例があれば説明してほしい。

[説明] 質問の3件については、下表に示す添付資料に示す。

質問の内容	説明資料
①ウラン濃縮技術の比較	添付資料-1
②原子レーザー法ウラン濃縮技術についての概要	添付資料-2
③国外でのウラン濃縮技術の経済性評価	添付資料-3

ウラン濃縮法の比較

	遠心分離法	原子レーザー法	分子レーザー法
使用レーザー		銅蒸気レーザー＋色素レーザー	パルス炭酸ガスレーザー＋ラマンレーザー
使用波長		可視光	赤外光
作業物質	六フッ化ウラン (気体)	金属ウラン (高温原子蒸気)	六フッ化ウラン (気体)
製品形態	六フッ化ウラン (気体)	金属ウラン	五フッ化ウラン (固体)
設備運転温度	室温	高温 (約1200℃)	室温
現状	商業プラントが稼働中	商業機レベルの要素機器の開発を終了した	技術の可能性をみきわめた段階
研究開発費の総額	約2000億円(国、電力)	628億円 ・318億円(国) ・310億円(電力) ・平成12年～14年に100億円を予定	87億円(国)
濃縮役務費 (KgSWUあたり)	9000円～10000円 (次世代遠心機)	7700円	8600円～10800円
研究開発実施機関	動燃事業団	レーザー濃縮技術研究組合	動燃事業団
技術的課題	—————	材料耐食性の向上 レーザーの低コスト化	分離スキームの最適化 レーザーの低コスト化

原子レーザー法ウラン濃縮技術の特徴

1. 原子レーザー法ウラン濃縮技術

原子レーザー法同位体分離(AVLIS:Atomic Vapor Laser Isotope Separation)は、特定の同位体だけを選択的に励起・電離する波長のレーザーを照射し、生成したイオンを電気的に回収して、濃縮した同位体を得る技術である。この技術の最も有望な適用先がウラン濃縮であり、天然ウランに含まれる0.7% ^{235}U から1回のプロセスで軽水炉燃料に必要な約5%の濃縮ウランが得られるため、その経済的なメリットから次世代のウラン濃縮技術の本命として、日、米、仏それぞれ独自に実用化に向けた技術開発が進められている。

わが国ではレーザー濃縮技術研究組合が、能力を商業規模にまで高めることを基本として要素機器の開発を進めており、大幅な性能向上、機器寿命の向上を図っている。

2. 原子レーザー法ウラン濃縮の概要

AVLISでは真空容器内で高出力電子ビーム照射によって発生させた金属ウラン蒸気に、 ^{235}U だけを選択的に励起・電離するレーザー光を照射し、生成したイオンを電気的に電極に回収して濃縮ウランを得るものである。AVLISのプロセス概念図を図1に、また、AVLISによるウラン濃縮プラントの概念図を図2に示す。AVLISプラントを構成する設備としては、レーザー装置と分離装置に大別される。レーザー装置は色素レーザーとこれを励起するための銅蒸気レーザーにより構成される。生産能力1,500トンSWU/年の

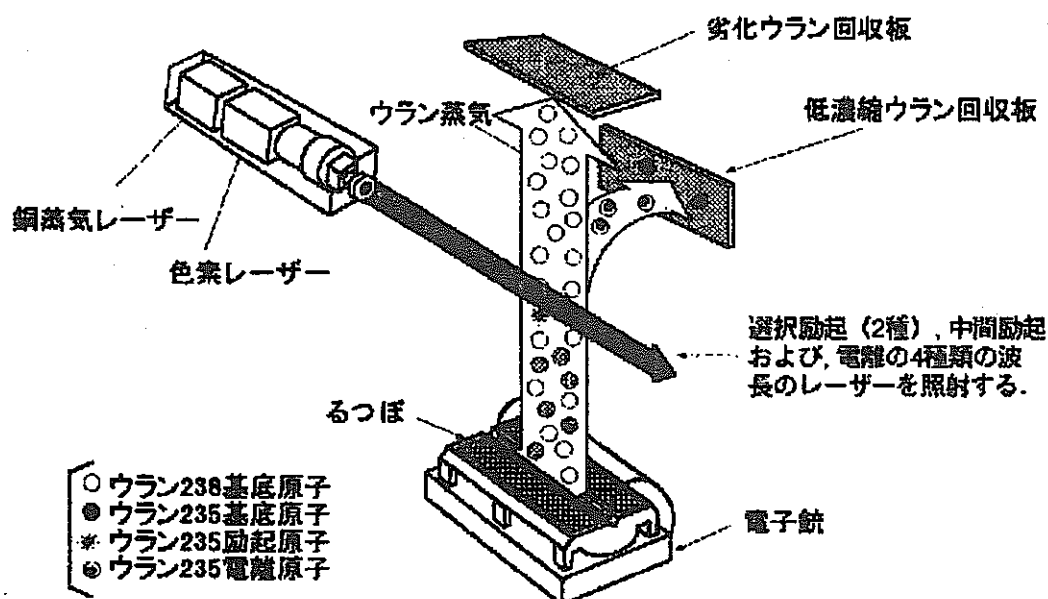


図1 原子レーザー法ウラン濃縮プロセス概念図

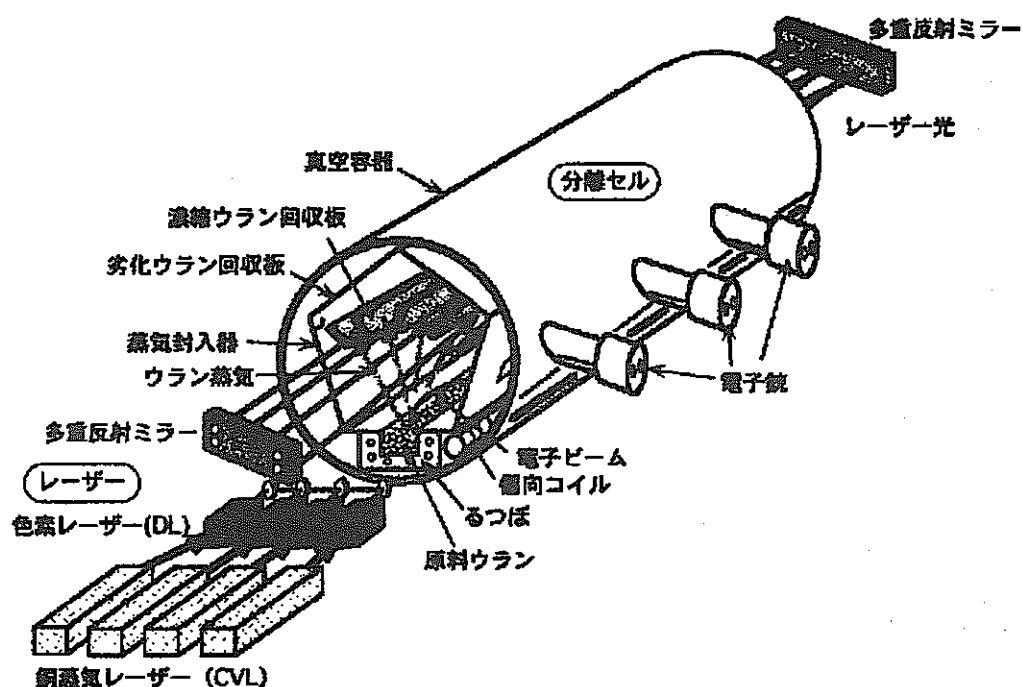


図2 原子レーザー法設備概念図

濃縮プラントでは数10kW出力の銅蒸気レーザーとそれによって励起される色素レーザーが必要である。

2. 1 銅蒸気レーザー

銅蒸気レーザー(CVL)は、セラミック放電管中での高圧パルス放電により銅を蒸発・励起させることにより、511nm(緑色)と578nm(黄色)の波長のレーザー光を発生する。セラミック放電管の大口径化(90mmφ)、長尺化(3.5m長)等によって単機出力600W級(繰り返し444~48kHz)を得ており、単機出力の開発目標を達成している。濃縮プラントではCVLを多数直並列に並べて運転する。

2. 2 色素レーザー

色素レーザーは銅蒸気レーザーを励起光源とし、 ^{235}U のみを選択的に励起・電離する波長の光を発生する重要なレーザーである。ウラン原子の電離ポテンシャルは約6.2eVにあるため、約2eVのエネルギーを有する可視光による励起では、3段階の共鳴励起(選択励起、中間励起、電離)でウラン蒸気中の ^{235}U のみを選択的に電離する。ウランの同位体シフト量は周波数にして3~5GHz程度であり、レーザーのスペクトル幅はそれよりも充分小さく制御される。他方、ウラン蒸気は約1,000m/secの高速で回収電極の間を通過するため、これにもれなくレーザーを照射するためにレーザーは10kHz以上の高繰り返し

返しパルス動作で運転する。色素レーザーは液体レーザーであり、パルス毎に色素溶液を下流に流して前パルスの残留熱歪みを除去するため、高速で且つ均一に色素溶液を循環できる流体設計された色素セルを採用している。

この他、CVLに換わる半導体レーザー励起固体レーザーの基礎開発、色素レーザービームの波面劣化を補償するための補償光学装置の開発等も行っている。

3. 分離装置

分離装置は金属ウランを入れるるつぼ、加熱蒸発させるための大出力電子銃、ウラン蒸気を回収するための回収装置、およびそれらを収める真空容器より構成される。

3. 1 蒸発装置

真空容器である分離装置内で、るつぼに入れた金属ウランを電子ビームにて加熱・蒸発させ原子蒸気流を形成する。電子ビームは偏向磁場によってるつぼの中心に入射し、熔融ウラン表面の数 μm でそのパワーを放出して高温(3,000K以上)に表面加熱し、ウラン蒸気を発生する。出力300kWの電子銃を開発し、濃縮プラントの前提となっている高い蒸発効率をほぼ実現している。

3. 2 回収装置

光電離した ^{235}U イオンを電氣的に濃縮ウラン回収板に集め、電離されないウラン原子(主として ^{238}U)は劣化ウランとして回収される。回収板に付着した熔融ウランは高温に維持された回収板を流れて一ヶ所に集められて外部に取り出される構造である。

レーザー濃縮技術研究組合では商用機レベルの大型分離装置の設計・製作を進めており、平成10年度からは長時間連続運転試験を含めて、その性能評価試験を予定している。

(出典：オプトロニクス社「レーザー応用に関する47章」(社)レーザー学会編)

ウレンコが行った濃縮技術に関する経済評価について

ウレンコは、イギリス、オランダ、ドイツが共同出資して設立した商業役務濃縮会社で、遠心分離法による濃縮を行っている。

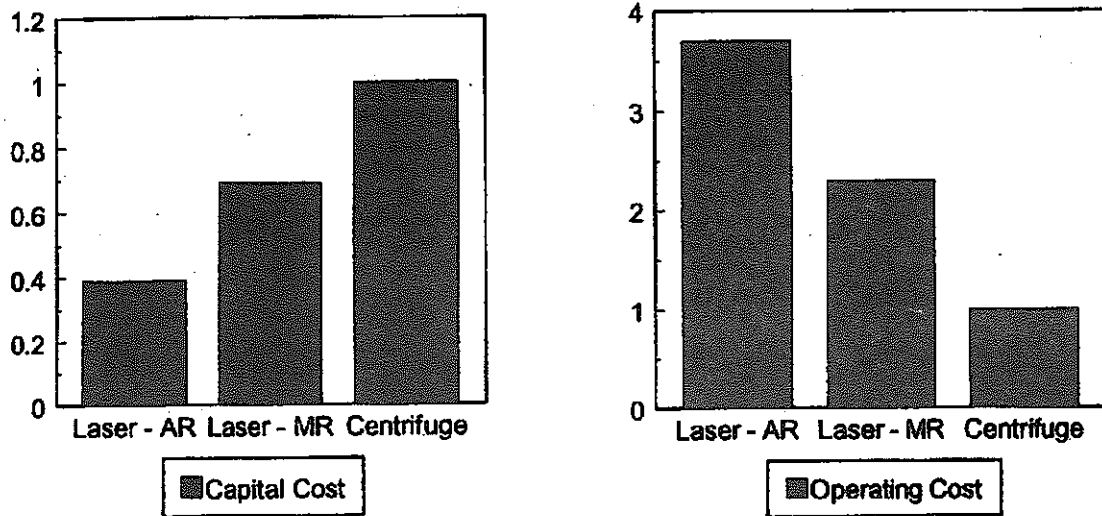
ウレンコにおいても、次世代の濃縮技術として分子法（ドイツが実施）、原子法（イギリスが実施）の開発を1970年代初頭から実施していたが、1992年から1993年にかけて、遠心法とのC&Rが行われた。

評価結果の概要は以下のとおり。

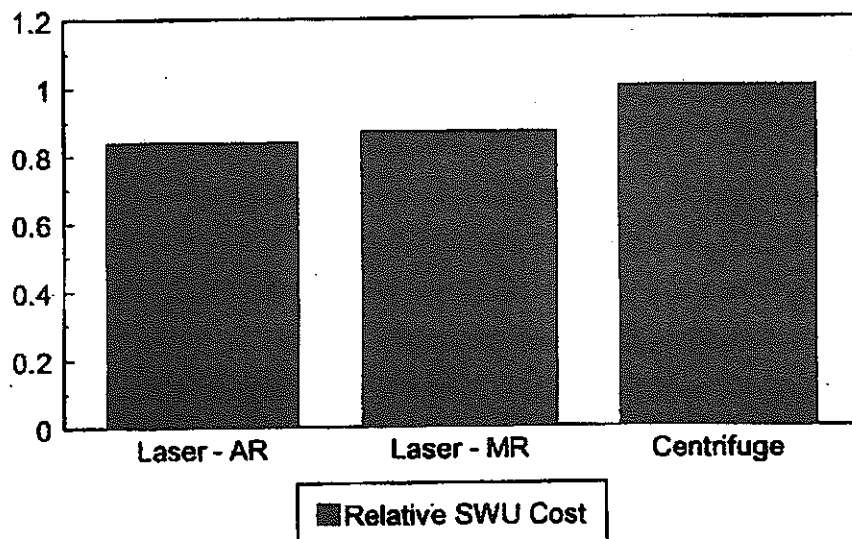
- ・分子法、原子法ともに技術的に不明確な点があり、遠心機の開発に比べてリスクが大きく、また、実用化までの研究開発費の評価で不確定性が大きい。
- ・今後の濃縮役務需要は、予測が難しく、需要に応じて小規模な増設が可能な遠心法の方が競争力がある。

表に示されているように、コスト評価では、遠心法が一番高かったが、上記の理由により、総合評価では遠心法の高度化（高性能遠心機の開発）が選ばれた。

Capital and operating Costs



Comparative Cost Evaluation



※ Laser-AR (原子法)、Laser-MR (分子法)、Centrifuge (遠心法)

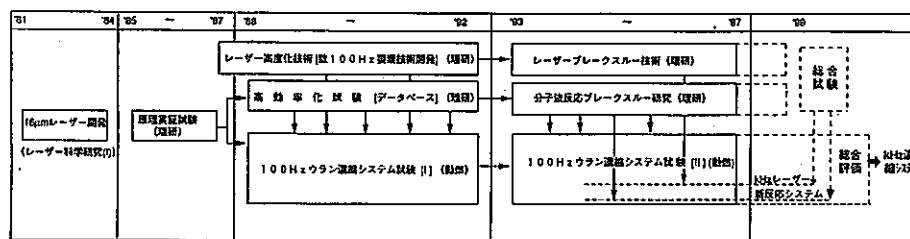
参 考 資 料 7

分子レーザー法ウラン濃縮の研究開発
－基礎研究から工学研究への発展－
(理化学研究所資料)

分子レーザー法ウラン濃縮の研究開発 — 基礎研究から工学研究への発展 —

理化学研究所
田代英夫

分子レーザー法ウラン濃縮研究開発計画



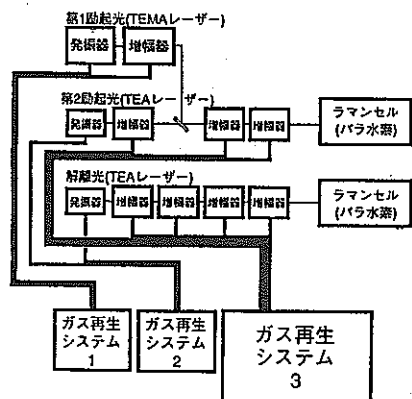
レーザーブレイクスルー研究年次計画

	平成5年度	平成6年度	平成7年度	平成8年度	平成9年度
1. 重水素ラマンレーザーの開発	重水素ラマンレーザー用TEA CO ₂ レーザーの製作			ラマンセル改造	動作試験・評価
2. 内部変換型ラマンレーザーの試作開発				設計・試作	動作実証試験
所要経費(百万円)	61	61	61	28	23

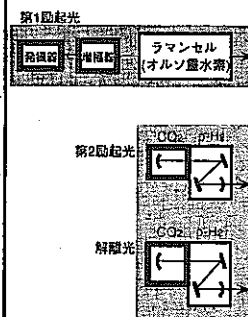
レーザーブレイクスルー研究の目的

スーパーラマンレーザーシステムの開発

・従来型のラマンレーザーシステム



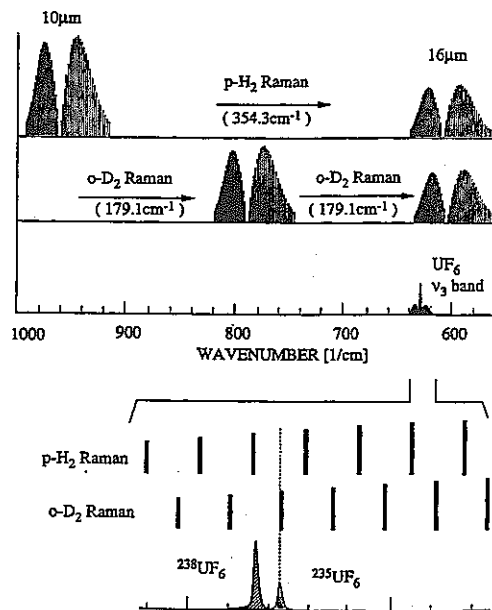
・スーパーラマンレーザーシステム



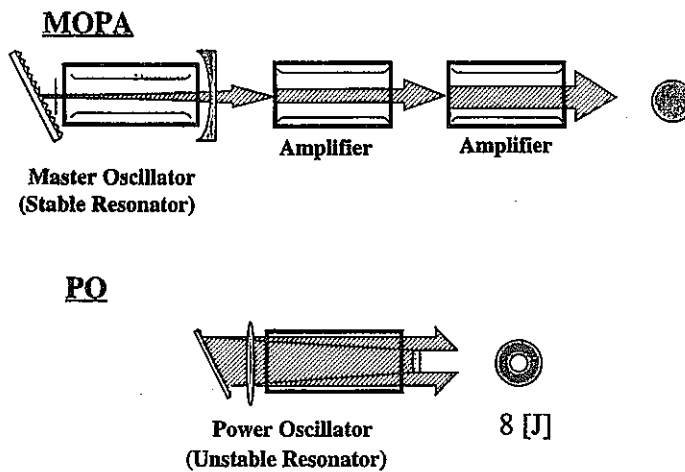
ブレイクスルー研究の研究項目:

- 重水素の励起・増幅・共振
- 内部変換型ラマンレーザーの開発・試作
- 完全封じ切り型CO₂レーザーの開発・試作

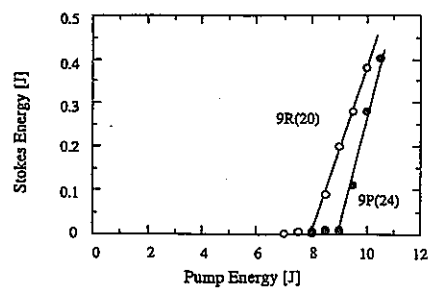
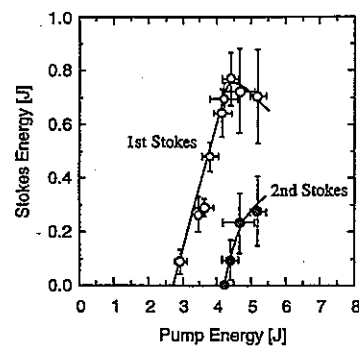
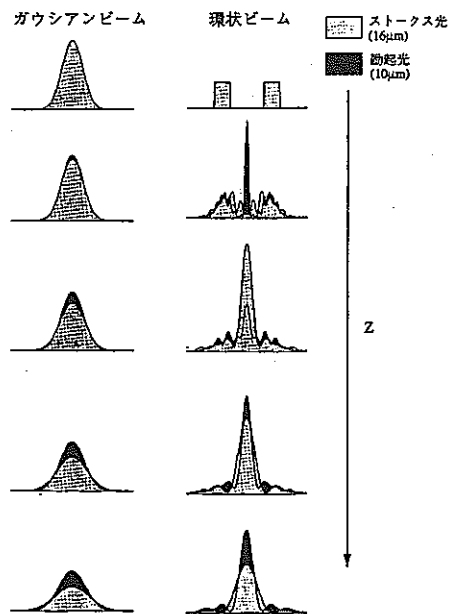
オルソ重水素による二次ストークス発生



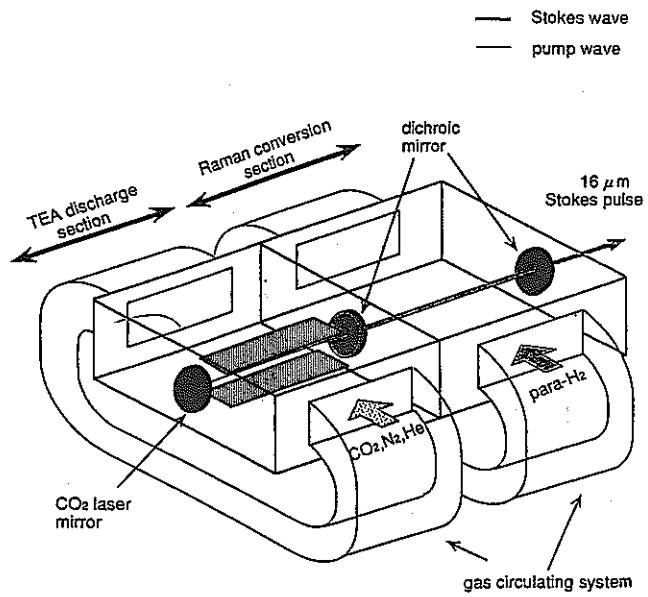
Power Oscillator



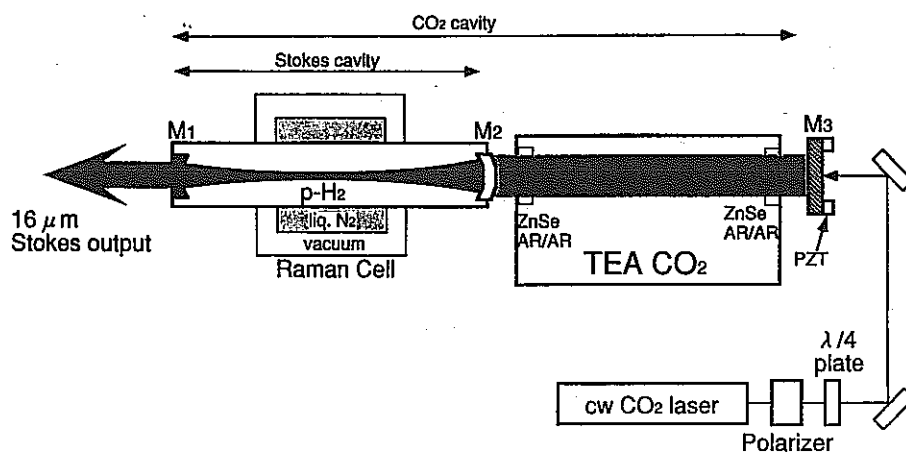
励起光とストークス光の伝搬による形状変化



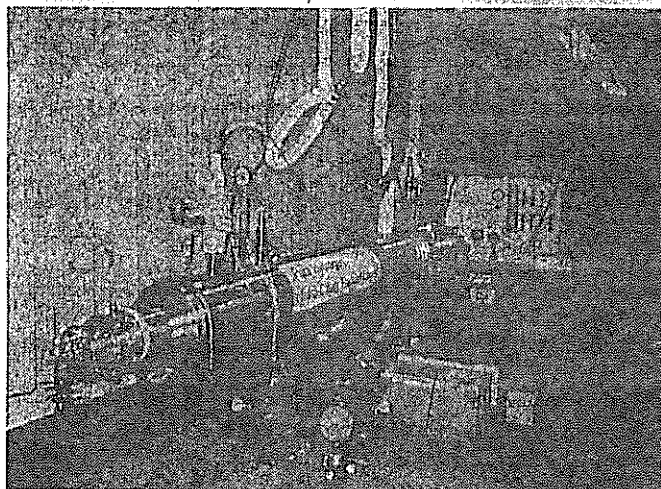
Plant Type Intra Cavity Raman Laser



Experimental Configuration of Intra Cavity Raman Laser



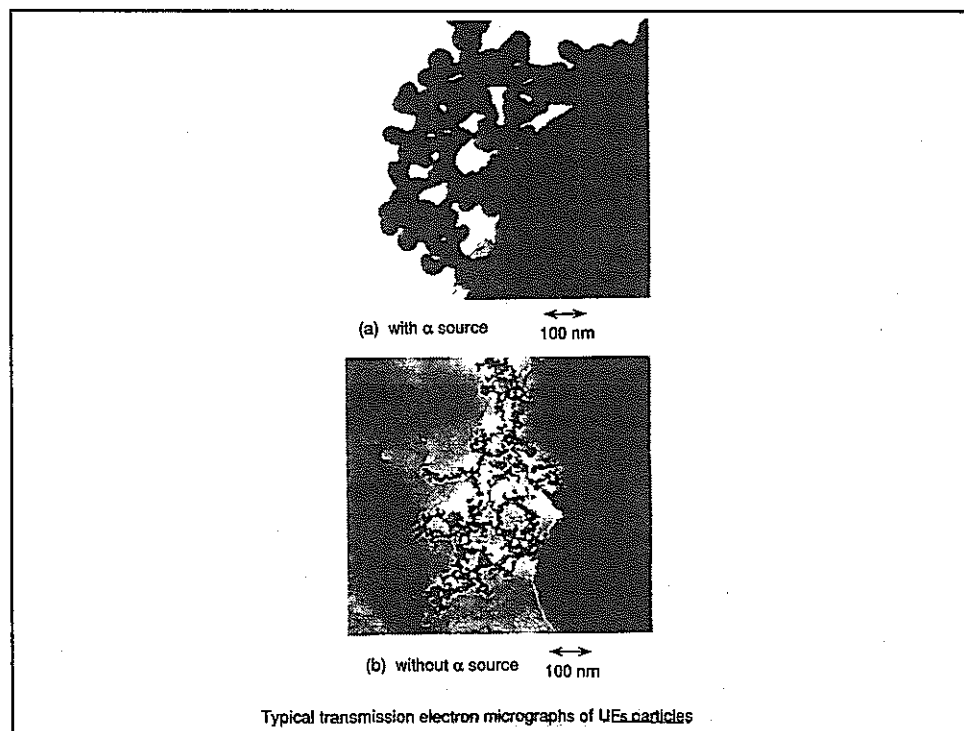
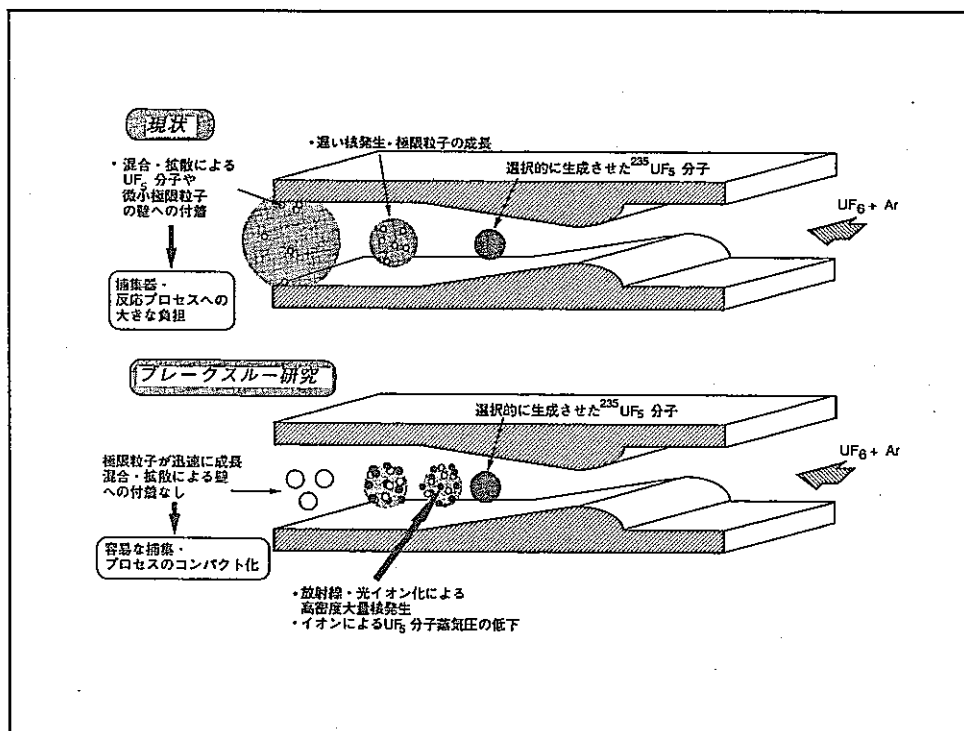
Intra-Cavity para-Hydrogen Raman Laser

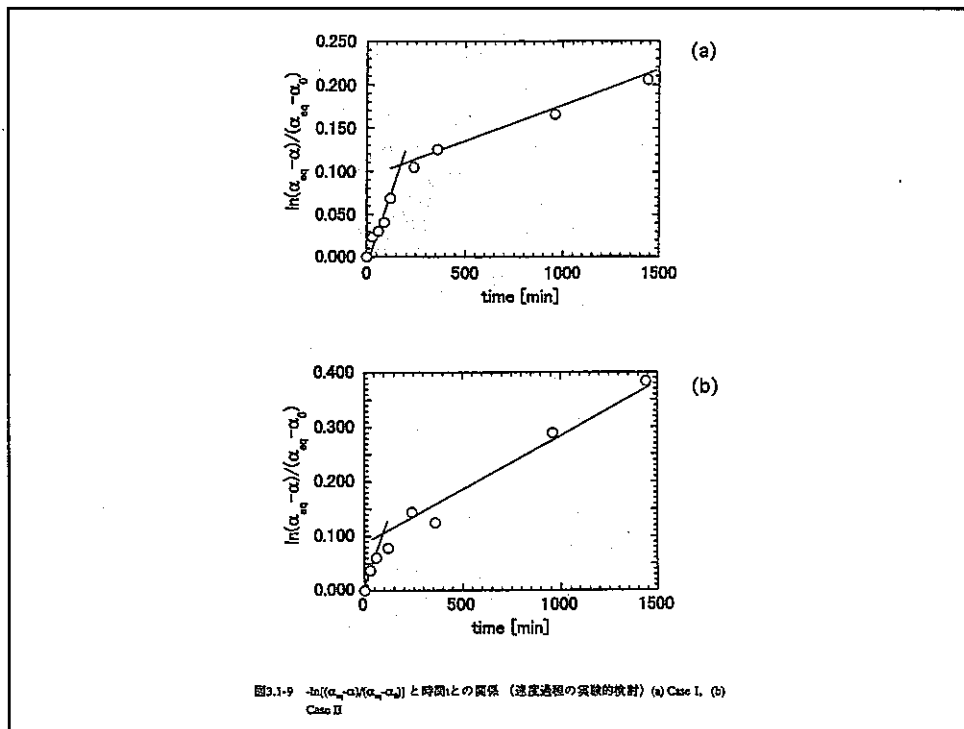
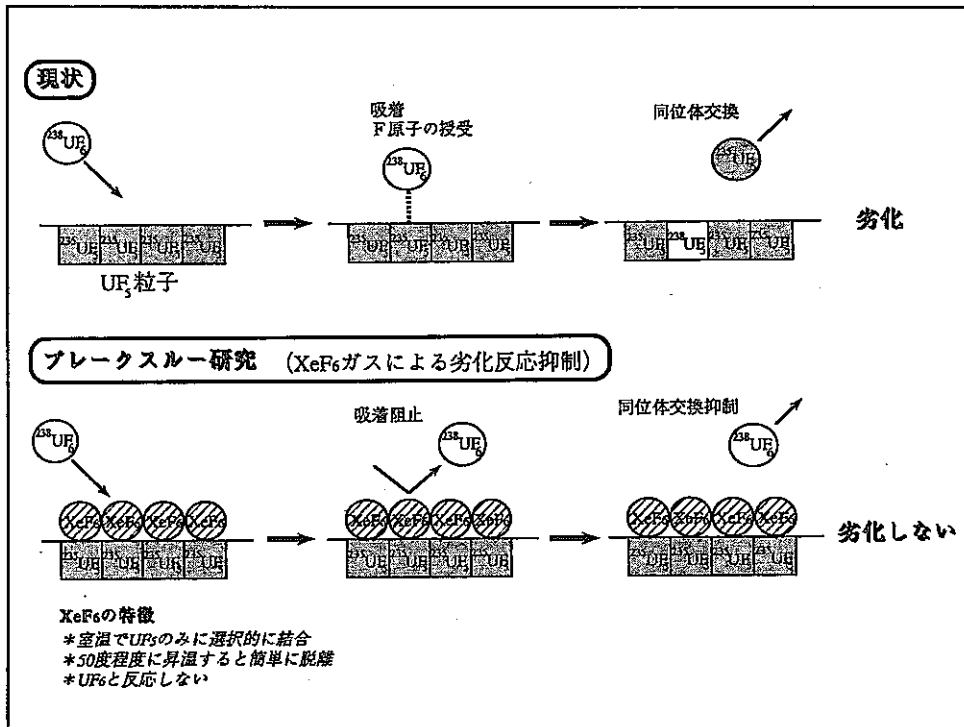


反応ブレークスルー研究(理研)

(動燃)

- UF_6 の高密度化
 - UF_5 粒子成長の促進
 - 同位体交換反応の抑制
- 新反応システム
- 100Hz反応システム





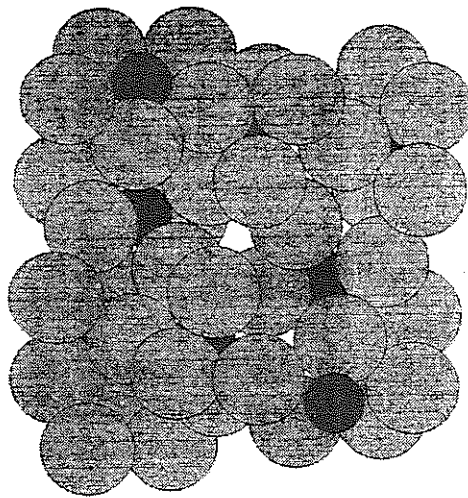


図3.1-12 β - UF_6 の結晶構造 (c_0 方向から見た図)

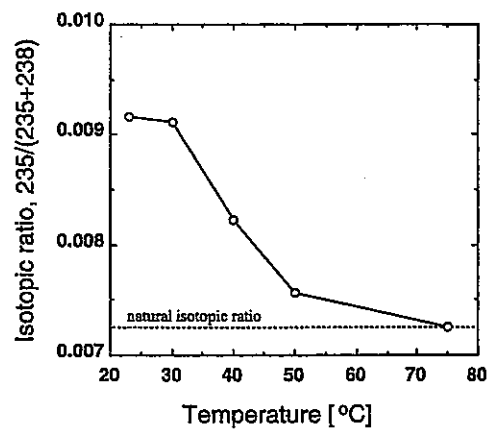


図3.1-14 同位体交換反応の抑制のためのアニーリング処理温度と反応後のガス側の同位体比

理化学研究所－動燃事業団の研究協力(I)

—レーザー関係—

1. kHz級レーザー技術開発に関する研究協力
 - kHz級レーザーシステムの技術開発を進めるため、理研所有の先行機を用いた試験を実施し、設計データを取得
 - システムの概念設計の実施および開発計画に関する検討
2. 100Hzレーザーシステムに関する研究協力
 - 動燃の工学試験装置レーザーシステムの高度化に関する検討と試験、TEMA狭帯域化、光学材料試験
 - 濃縮試験の結果等に関する評価・検討、および試験条件計画に関する意見交換
3. 研究者交流に関する研究協力
 - (1)理研所有のkHz級炭酸ガスレーザー先行機を用いて、設計データ取得を目的とした試験
 - (2)理研所有のTEMAレーザーを用いて、TEMA狭帯域化を目的とした予備試験
 - (3)理研所有のkHz級炭酸ガスレーザー先行機を用いて、光学材料の耐光強度等の評価を目的としたレーザー照射試験
 - (4)理研所有の炭酸ガスレーザー(KDM3)を用いて、設計データ取得を目的とした試験

理化学研究所－動燃事業団の研究協力(II)

—プロセス関係—

動燃の濃縮試験の結果等に関する評価・検討、および試験条件に関する意見交換

- 同位体交換反応の機構解明と抑制手法
 - 同位体比変化の分析(動燃担当)
 - 生成UF₆微粒子の物性評価
 - X線回折、光電子分光、TEMなどの粒子分析(動燃担当)
 - 同位体交換反応機構の解明
- 動燃100Hz反応システムに対して
 - インパクターによるUF₆捕集器の設計に反映
 - 粒子成長部の設計に反映
- 新反応システムに対して
 - 同位体交換反応抑制型UF₆捕集装置
- 複数の論文