

研究会資料

08-3

SILEX

第三世代のウラン濃縮技術

経営企画部 戦略調査室

須藤 収

2008年5月22日

オーストラリアにおけるウラン濃縮研究開発の歴史－1

- ・1965年、AAEC (Australian Atomic Energy Commission) がウラン濃縮研究を開始。遠心分離法とレーザー濃縮法についての研究が行われたが、主に、遠心分離法に集中して実施。
- ・1971年、米国よりガス拡散法による濃縮工場建設の提案。
- ・1971年~1972年、フランスとガス拡散法による濃縮工場建設について検討。
- ・1973年~1974年、ウレンコと遠心分離法による濃縮工場建設について検討。
- ・1973年~1979年、南オーストラリア州政府によって、転換工場と濃縮工場の建設プロジェクトが検討されたが、1979年に中止。
- ・1976年~1978年、日本(動燃)と遠心分離法によるウラン濃縮工場建設について検討。

オーストラリアにおけるウラン濃縮研究開発の歴史－2

- ・1980年、4つの民間会社がEUGA (the Uranium Enrichment Group of Australia)を設立し、ウレンコの遠心分離機を導入した濃縮工場建設プロジェクトを立ち上げ。1982年、フィージビリティ研究を終了し、オーストラリア政府へウレンコの技術導入のための政府間協定締結を要望。
- ・1983年、労働党が政権をとり、AAECにウラン濃縮研究の終了を指示。EUGAのウレンコ技術導入のための政府間協定締結の要望を無視。EUGAのプロジェクトは中止。

1998年に制定された法律により”the Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency”は、オーストラリア連邦内で、原子力施設(燃料加工工場、濃縮工場、再処理工場、原子力発電炉)の建設・運転に関するライセンスの発行を禁止されている。

SILEX法の開発の歴史－1

▪ SILEX

Separation of Isotopes by Laser Excitation

▪ 発明者

▪ Michael Goldsworthy

1988年、ニューサウスウェールズ大学で物理学のPhD取得。Silex Systems Limitedの創立者。

▪ Horst Struve

1970年、ニューイングランド大学で物理化学のPhD取得。ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organization) で25年間レーザー同位体分離研究に従事し、研究開発グループのリーダーを務めた。

SILEX法の開発の歴史－2

- ・1988年、Sonic Technology (後のSonic Healthcare)の研究子会社として、Goldsworthy (29歳)によってANE (Australian Nuclear Enterprise Pty Ltd、後のSilex System Ltd)が創立された。
- ・1990年、ANEが考案した新しいレーザー同位体分離の概念の実証についての研究コンサルタント契約をANSTOと結びSILEX法の研究開発を開始。ANSTOのLucas Heights 研究所のスタッフ及び設備を利用。ANSTO側のリーダーはStruve (47歳)。この契約は1994年まで継続。
- ・1992年、GoldsworthyとStruveは独創的なSILEX法の原理を考案。



ANSTOのLucas Heights 研究施設

出典: Google Earth



Lucas HeightsのSilexの研究所

出典: Google Earth

SILEX法の開発の歴史－3

- ・1994年、SILEX法の原理実証に成功。
- ・1995年、社名をANEからSilex (Silex Systems Ltd) に変更。
- ・1996年、Silex はSonic Healthcareから分離独立。USECとSILEX法の共同開発協定を締結。開発資金を獲得。
- ・1998年、Silexは、オーストラリア株式市場に株を上場ANSTOよりリリースしていた設備を購入。StruveがANSTOを退職し、Silexのtechnical managerに。
- ・2001年、SILEX法がオーストラリア政府と米国政府の保障措置協定の機微情報管理下に。

Development of Silex enrichment technology



出典: ASNO(Australian Safeguards and Non-Proliferation Office)
Annual Report 1999~2000

SILEX法の開発の歴史－4

- ・2002年、Silex Direct Measurement Facilityを使用したDirect Measurement Programを開始
- ・2003年、グラムオーダーの試料を回収し、測定可能な濃度変化を確認。しかしながら、USECが共同開発から撤退。USECの投資額は約2600万ドル。
- ・2005年、Direct Measurement Programを完了。試験結果をもとにプロセス効率及び経済性を評価し、遠心法より優れていることを確認。パイロットプラントの設計研究を完了。
- ・2006年5月22日、GEと共同開発の協定を締結。10月6日、米国政府より協定の最終承認を得る。

Development of Silex enrichment technology



出典: Silex Annual Report 2006

GE Energy Technology Update “Uranium Enrichment with Laser Isotope Separation”



出典:

http://www.ge-energy.com/prod_serv/products/nuclear_energy/en/downloads/uranium_enrichment.pdf

Silex社とGEの共同開発計画について－1

－Silex Technology Development Program－

開発ステップ I

◆ Test Loop

- ・フルスケールのレーザー装置と分離装置を組み合わせた濃縮試験を実施し、フルスケールでの技術実証を実施
- ・Test Loopの規模は商業規模の1/2スケール
- ・UF6の使用量は440ポンド(約189Kg)以下
- ・閉ループで製品と廃品は混合し原料供給へリサイクル
- ・試験場所はノースカロライナ州ウィルミントンに隣接したGE子会社のGlobal Nuclear Fuel-Americaの燃料加工工場内
- ・2007年の上半期中にLucas Heightsの開発チームと既存の設備を米国へ移動し、2007年11月から試験開始予定であったが、Test Loopは現在建設中。
- ・2008年5月12日、NRCより運転許可を取得。施設の建設はほぼ完了し、近々にレーザー装置、UF6ガス取り扱い装置等の設置を開始する予定。

Silex社とGEの共同開発計画について－2

－Silex Technology Development Program－

開発ステップⅡ

◆商業プラント

- ・Test Loopで、生産規模での設計パラメーターを最適化し、装置の信頼性及びプロセス効率を実証し、それらの評価を行った後に商業プラントの建設開始の最終判断を実施。
- ・Test Loop プログラムは、2008年の終わりもしくは2009年の初めには完了し、2009年の初めのできるだけ早い時期に、商業プラントの建設開始を判断する予定。
- ・商業プラントの建設場所は、ノースカロライナ州ウィルミントンでのGE本社サイト内に決定。
- ・商業プラントの目標設備容量は3500～6000tSWU/y。
- ・運転開始は2012年を目標。
- ・建設運転は、GEH(GE-Hitachi Nuclear Energy)の子会社のGLE(Global Laser Enrichment)が担当する。

Silex社とGEの共同開発計画について－3

－Silex Technology Development Program－

◆GEからSilexへの成功報酬

- ・協定の米国政府の仮承認 500万ドル(2007年6月6日)
- ・協定の米国政府の最終承認 1500万ドル(2007年10月6日)
- ・Test Loopの成功 1500万ドル
- ・Lead Cascade の成功 2000万ドル

◆Royalty

- ・基本Royalty 売上げの7%
- ・開発コストの額に応じて、さらに5%までRoyaltyを増加できる
(開発コストが安ければ安いほどRoyaltyは多くなる)

SILEX法についての情報－1

Silex Direct Measurement Facilityの設備情報

◆UF6ガスプロセス設備

- ・UF6とキャリアーガスの供給ベッセル
- ・分離プロセスベッセル
- ・製品及び廃品の混合回収ベッセル
- ・その他、配管、排気設備等

◆レーザー設備

- ・パルス炭酸ガスレーザー 複数台
- ・最大繰り返し: 300Hz(濃縮試験では50Hz)
- ・パルスエネルギー: 1J(照射波長では1Jより減少)
レーザーガスは高気圧で発振
- ・ラマンセル
パス回数: ~25回
変換効率: ~25%

SILEX法についての情報-2

Goldsworthyのオーストラリア議会委員会での証言(2006.2.9)-1

- ・作業物質はUF₆
 - ・原料、製品及び廃品はUF₆で既存の燃料サイクルに適合
 - ・UF₆はキャリアーガスと混合して使用
 - ・レーザー照射波長は1波長で、同位体の励起にのみ使用
-
- ◆原子法、分子法に比べてエネルギー消費量は非常に少ない
 - UF₆のν₃バンド(約628cm⁻¹)の励起エネルギーは0.078eV
 - 原子法のU⁺への電離エネルギーは6.4eV
 - 分子法のUF₅への解離エネルギーは3.2eV
 - 必要エネルギーは原子法の1.2%、分子法の2.4%

SILEX法についての情報－3

Goldsworthyのオーストラリア議会委員会での証言(2006.2.9)-2

- ・レーザーシステムはパルス炭酸ガスレーザーとパラ水素ラマンセルの組み合わせ
- ・パルス炭酸ガスレーザーは高気圧で発振し、照射波長ではパルスエネルギーは1Jに達しない
- ・ラマンセルの変換効率は~25%、パス回数は~25パス
- ・レーザーのパルスエネルギー、ピークパワーが低く光学部品の損傷問題がない

◆分子法よりレーザーシステムは小さくなる

SILEX法についての情報－4

Goldsworthyのオーストラリア議会委員会での証言(2006.2.9)-3

・レーザー設備

パイロットプラントのレーザー設備の構成は発振器＋増幅器のMOPAチェーンに波長変換器。ビーム伝送系はマルチプレクサ。非常に精巧なレーザーで、既存の技術を超えたもの。しかし、工業化は可能。

・SILEX法は遠心法よりも非常に複雑で精巧な技術であり、構成部品類の製造には非常に特別な技術が必要で、核不拡散性が遠心法よりも高い。

・プラントの大きさは商業規模では遠心法より小さいが、小規模の施設では遠心法と同程度。

・分離係数は2~20、カスケードの段数は数段で遠心法より少ない

・建設コストは遠心法の1/3。

・開発には、パイロットレベルまで6~7年、商業化まで10年が必要。

SILEX v Existing Technologies

	SILEX	CENTRIFUGE	GAS DIFFUSION
DEVELOPED	2000's	1940's	1940's
PROCESS	Laser Excitation	Mechanical (‘centrifugal force’)	Mechanical (‘brute force’)
ENRICHMENT EFFICIENCY	2 to 20 ⁽¹⁾	1.3	1.004
COST COMPARISON	Potentially Attractive	Capital Intensive	Very expensive
% OF EXISTING MARKET⁽²⁾	0%	54%	33%
STATUS	Under Development 3rd Generation	Proven 2nd Generation	Obsolescent 1st Generation

(1) This number is Classified – the range indicated is dictated by the technology Classification Guide

(2) Approximately 13% supplied via Russian HEU material

出典: Michael Goldsworthy, Silex Systems Limited, "Nuclear Power Outlook", Citi Climatic Consequences, London, June 4-6, 2007

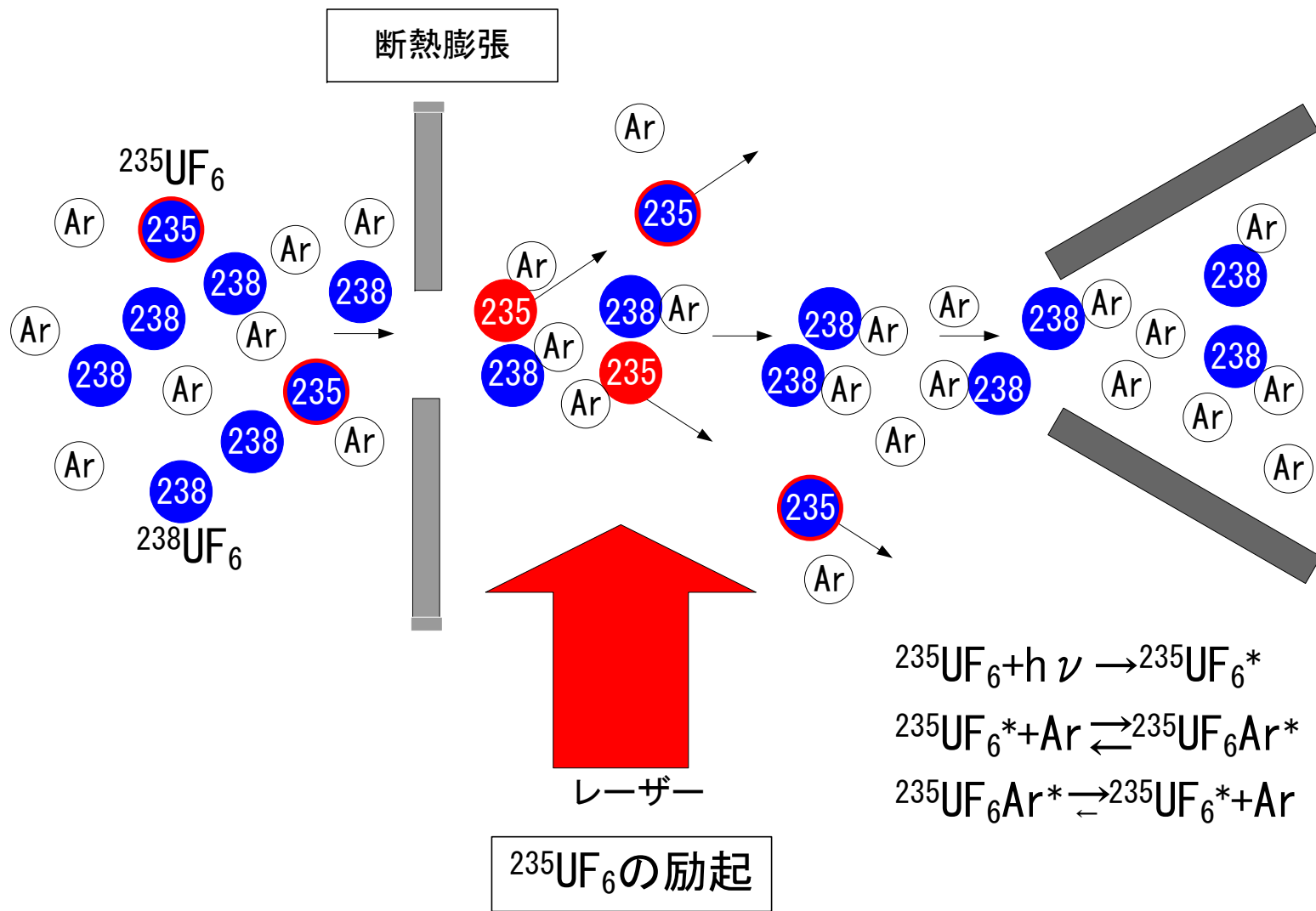
SILEX法についての推定－1

・Infrared-Laser-Assisted Gas-Dynamic Isotope Separation

従来のウラン濃縮法は同位体間の質量差に着目して遠心力や拡散係数の違いを利用して分離する方法であるが、質量差と質量の比が小さく分離効率は悪い。

UF₆をHe, Ar等の希ガスで希釈し、超音速ノズルから断熱膨張させると極低温になり、UF₆は希ガスとクラスター(van der Waals分子、UF₆Ar等)を生成する。ノズル出口で、例えば²³⁵UF₆だけレーザーで励起すると、²³⁵UF₆Ar*は過剰なエネルギーを持っているため、簡単に²³⁵UF₆とArに分解する。下流にスキマーを置いておくと、分解して生成した²³⁵UF₆は反跳して進行方向が変化し、スキマーを通過する割合が²³⁸UF₆Arより少なくなり、スキマーを外れた気体中に²³⁵UF₆が濃縮され、スキマーを通過した気体中に²³⁸UF₆が濃縮される。

SF₆での分離実験で分離係数1.6を得ている。



光子エネルギー: 0.078eV

UF₆とArの分子間ポテンシャル: ~0.02eV

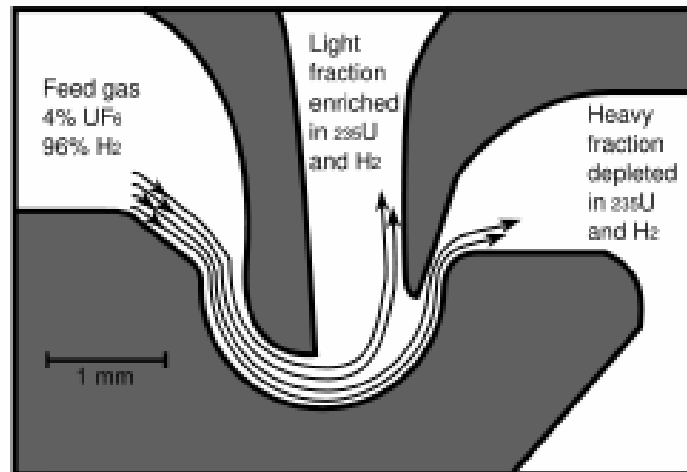
Infrared-Laser-Assisted Gas-Dynamic Isotope Separation

SILEX法についての推定－2

・SILEX法は、

Infrared-Laser Assisted Gas Dynamic Isotope Separationを改良した分離方法か、

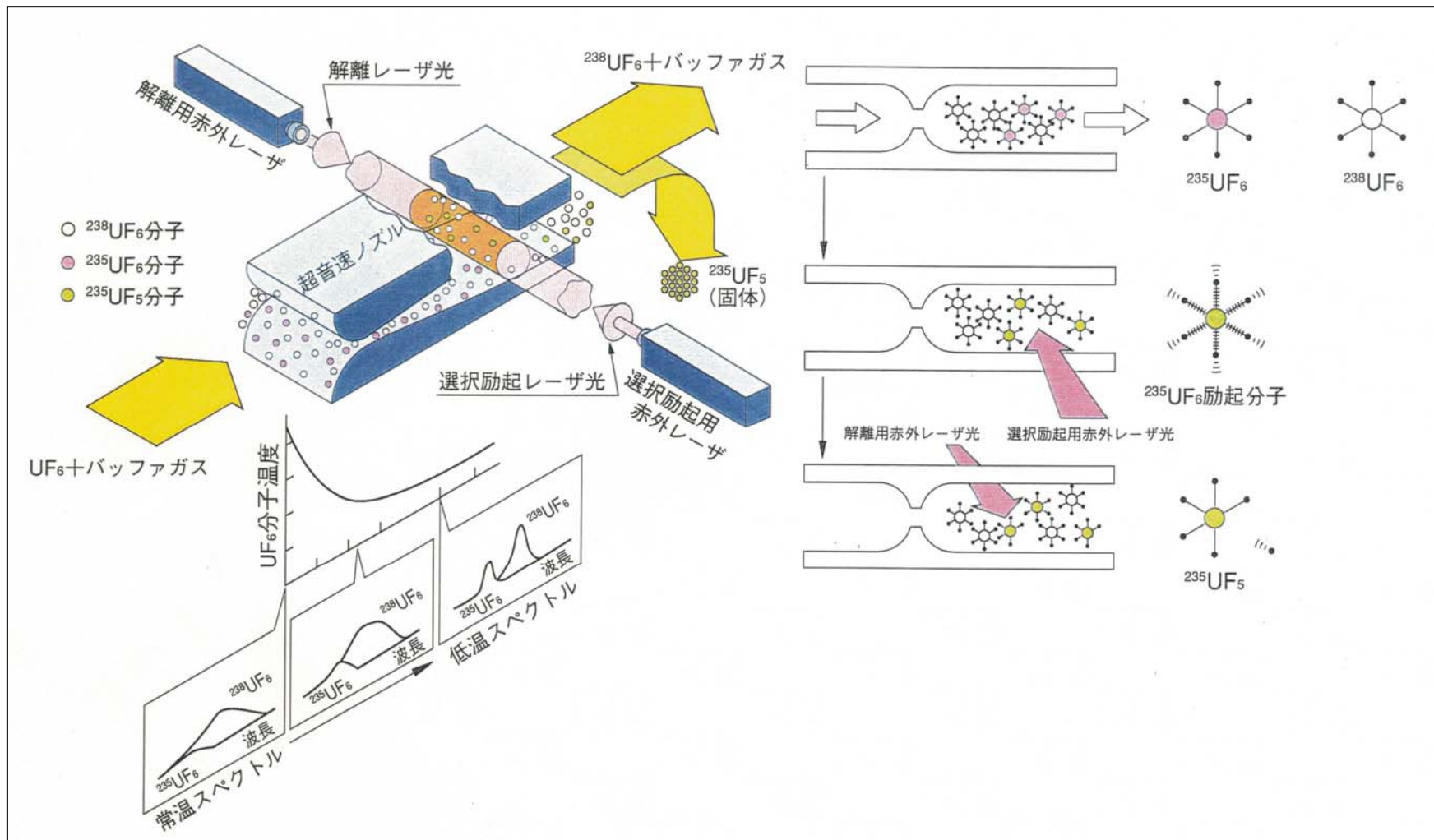
Infrared-Laser Assisted Gas Dynamic Isotope Separationとノズル法のような**Aerodynamic Isotope Separation**を組み合わせた分離方法



SILEX法と分子法の比較

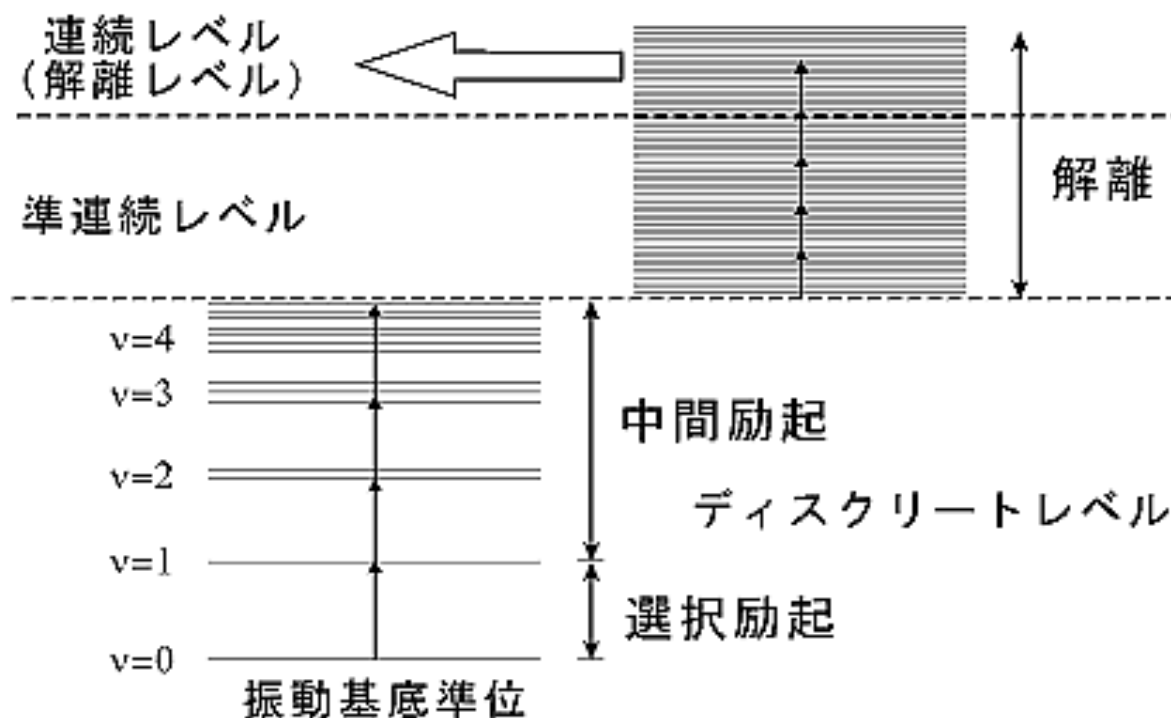
	SILEX法	分子法
供給物質	UF6	UF6
製品	UF6	UF5(固体)
廃品	UF6	UF6
分離方法	選択励起	選択励起+赤外多光子解離
分離係数	2~20	Max15
温度	100K以下	100K以下
冷却方法	断熱膨張	断熱膨張
分子密度	<	
分離装置規模	>	
レーザーシステム	高気圧パルス炭酸ガスレーザー1系列 パラ水素ラマンセル 1台	高気圧パルス炭酸ガスレーザー1系列 パルス炭酸ガスレーザー 2系列 パラ水素ラマンセル 2台
レーザー波長	~16 μ m、1波長	~16 μ m、3波長
必要光子エネルギー	0.078eV/分子	3.2eV/分子
レーザー設備規模	>	

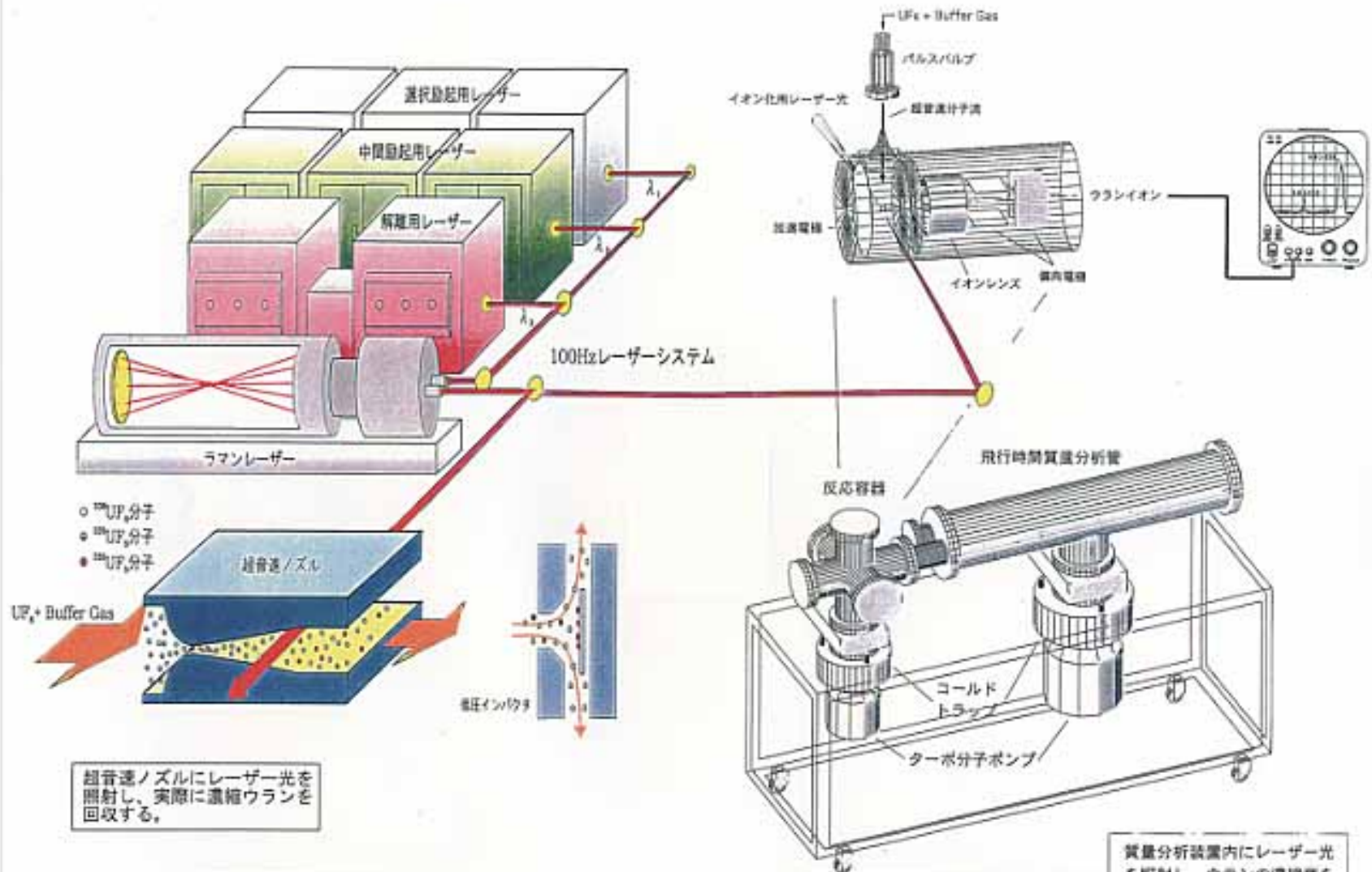
參考資料



分子レーザー法原理図

振動励起レベルの構造





超音速ノズルにレーザー光を照射し、実際に濃縮ウランを回収する。

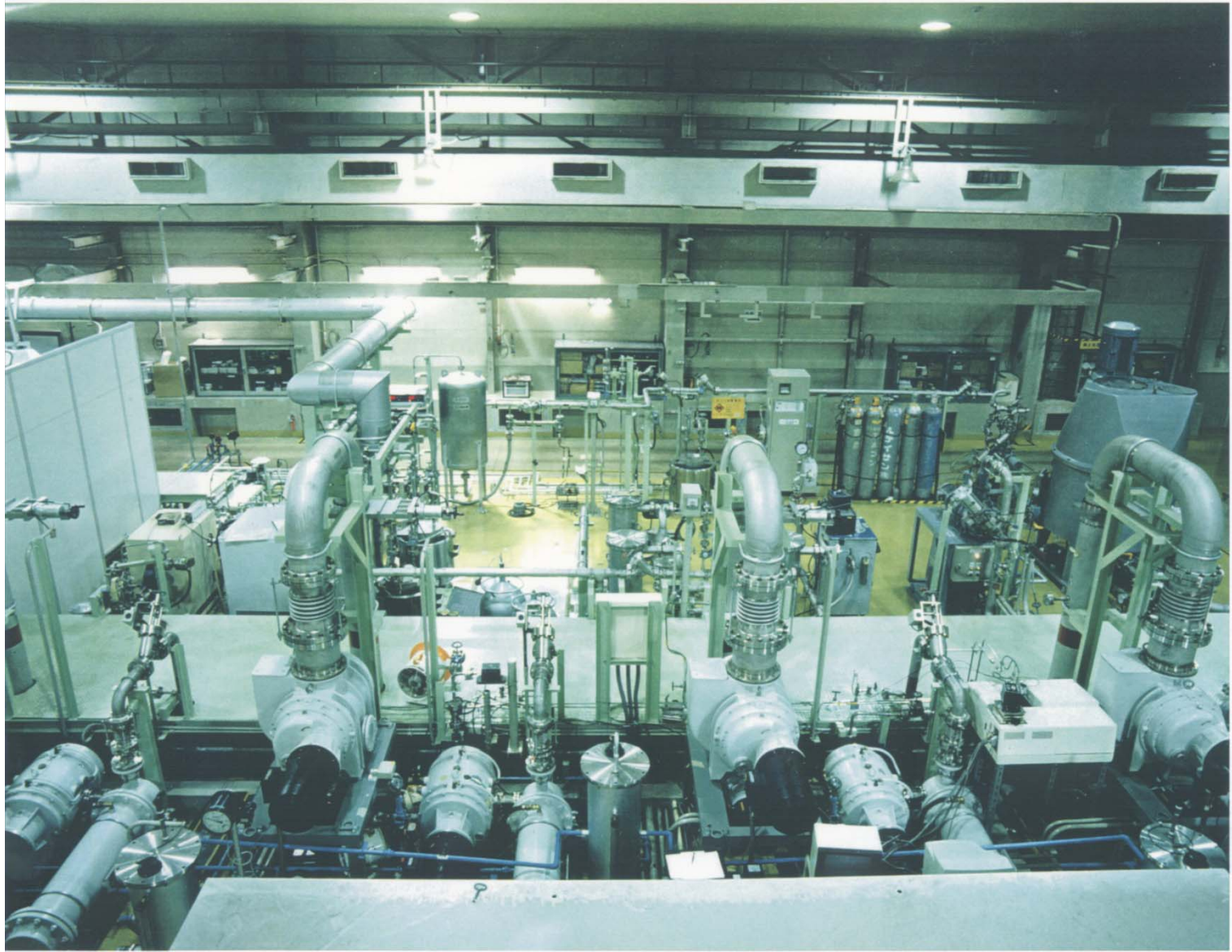
ウラン濃縮試験

質量分析装置内にレーザー光を照射し、ウランの濃縮度を電気信号に変えて検出する。

分離基礎試験



分子レーザー法レーザーシステム



分子レーザー法UF6ガス取り扱い設備

Silex の安定同位体のレーザー濃縮プロジェクトー1

◆Si28の同位体分離

・半導体デバイス材料であるSiの同位体Si28(存在率92.23%)を99.9%以上に濃縮して、伝熱特性を向上させ半導体の高集積化に対応することを目標に2000年よりレーザー同位体分離研究を開始した。2002年には、SUMCO(Sumitomo Mitsubishi Silicon Corporation)と共同研究協定を結び、2004年7月に完成したパイロットプラントで濃縮試験も実施したが、デバイスメーカーの需要がないことから、2006年に計画を中止した。

◆C13,O18の同位体分離

・医療診断に使用されるC13(存在率1.07%、ピロリ菌の検査等に使用)とO18(存在率0.2%、PET診断で使用されるF18の照射原料((p,n)反応)のレーザー同位体分離研究を2000年より開始、独自に開発を進めている。2007年に、Si28濃縮パイロットプラントを改造して工学試験を実施する予定。

Silex の安定同位体のレーザー濃縮プロジェクトー2

◆Zr92の同位体分離

・軽水炉燃料の被覆管材料であるZrの同位体の中で中性子吸収断面積の小さいZr92(存在率17.15%)を濃縮することで、原子炉内の中性子経済を向上させることを目的として、2000年9月に Westinghouse Electric Companyとレーザー同位体分離に関する共同研究協定を結び研究開発を行ってきたが、2004年9月に計画を中止した。