

原子レーザー法・ウラン濃縮技術の開発

Development of AVLIS Technology in Japan

森 岡 昇*

Noboru Morioka

私は昔若い頃、量子力学、特に量子電気力学を徹底的に勉強したことがある（量子電気力学は、最近では量子光学と言うらしい）。この特集は「光エネルギー利用技術」であるが、本題は、実は「光エネルギーの工業利用技術」なのである。

10年前、私が電力業界が始めたこの技術開発の責任者となった時、或る人から次のような警告を受けた。「森岡さん、光エネルギーの利用を工業レベルで成功させた例は殆どないですよ。原子レーザー法は本当に成功するんですか」と。私にとってこの警告はピンと頭に響くものがあったから、やれるだけやってみればこのプロジェクトを中止すべきだと業界に提言する積もりだった。

それからアッと言う間に10年が過ぎた。私はその間、電力会社の仕事から全く離れたサイエンスと深く係わる難解な技術の開発に専念したのである。

その間、私は自分で決定した選択肢について皆から反対されたため責任を感じて辞めようと考えたり、色々悩まされたりしながらも現在は、この開発の主要な技術課題を奇跡的に解決するに至ったと考えている。関係者の努力もさることながら、運とつきに恵まれたからだと思っている。まだ東京の浜松町に組合のオフィスがあった頃、毎朝、芝大神宮にお祈りをしたためではないかという気持ちになる。しかも量子力学の工業的応用として光エネルギーをウラン濃縮に利用する技術は従来技術に対して経済的に非常に有利であることも判明したのである。

だが、私の悩みはこの難解な技術をどうやってスポンサーに説明して判って貰うかということであり、今後私はこの方面にもっと力を入れねばと感じている。

1. 主要プロセス

原子レーザー法ウラン濃縮技術の主要プロセスは次

* レーザー濃縮技術研究組合 専務理事
〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-76

の通りである。（図-1参照）

まずるつぼの中に天然ウラン金属を入れ、電子銃で高速電子を打ち込む。電子の運動のエネルギーが熱に変わり、ウランを溶融し、特に中心の高温部からウラン蒸気が上方の真空中へ断熱膨張する。

このウラン蒸气流に、横から色素レーザー光を照射する。波長はウラン235だけが吸収するように選べるから、ウラン235だけが光のエネルギーを吸収して、量子力学的にエネルギー単位の高い状態に移行する。（励起と言う）。更に何段階か励起するとウラン235はイオンになる。

このイオンを電場で引き付けてウラン235を電極板上に集める。このようにウラン235が天然に含まれる0.71%より濃くなった濃縮ウランを液状にして重力を利用して回収する。以下この順序に説明しよう。

2. 蒸発系の開発

総ての開発課題の中で最も複雑かつ難解だった。るつぼの中では、溶けたウランが熱対流を起こし、るつぼ内壁を洗うようになると、溶融ウランによる強い腐食作用のため、るつぼがすぐやられてしまう。従ってるつぼを冷却して、内壁近くのウランを部分的に固化する。

一方、経済性を高めるため、ウランの蒸発流量は最少の電子銃kWに対して大きく取りたい。別の言葉で言えば、投入する電子銃の電気入力(kW)の内の何%を有効にウランの蒸発に振り向けるかという蒸発効率を向上したい。

こうなると、腐食を逃げるためにるつぼを冷却することが蒸発効率向上の逆モーションになっており、これが蒸発系の開発を著しく難しくしたのである。

又蒸発して上方に飛んで行ったウランの一部は凝縮して液体のまま、るつぼに戻さなければならぬから、蒸発系を包む蒸気封入器内の温度をウランの融点以上にする。

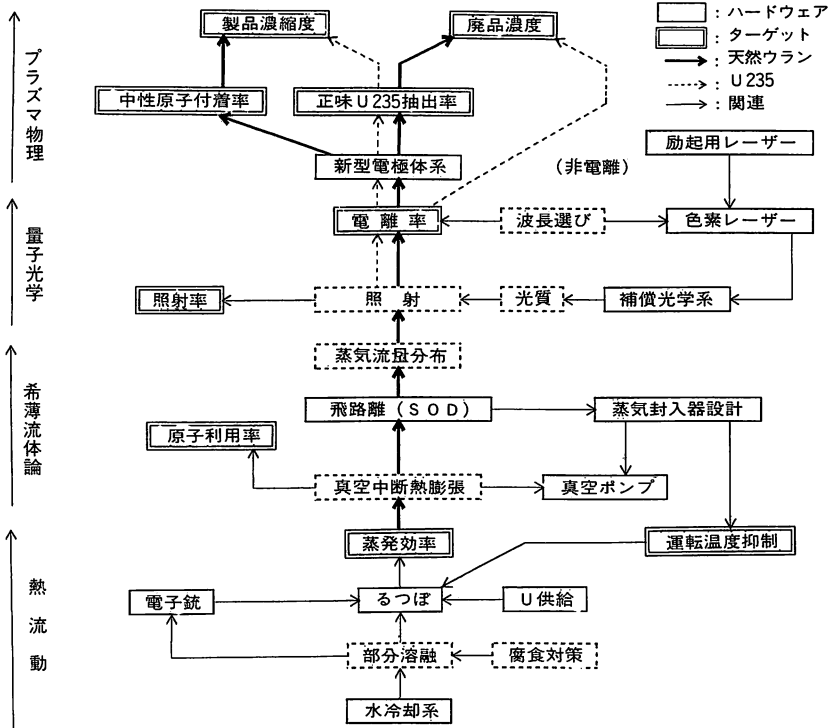


図-1 原子レーザー法ウラン濃縮の主要プロセス

この高温環境が色々な付随的な問題を発生した。このため、工夫をして温度を低下させることに成功したが蒸発系は益々複雑になった。専門的には、るつぼ内の熱流動を扱う専門分野をサーマル・ハイドロリクスという。「熱水力学」と訳しているが余り適訳とは思えない。ここでは熱流動論としておこう。この外、合金の状態図等の冶金の知識も必要であり、もう少し冶金とか非鉄金属の精錬等に詳しい専門家が参加していたらこれ程苦労しなかっただろう。特に私がるつぼ内の熱対流を抑制するために添加することにした金属について、蒸発が安定しないとか、蒸発効率は余り向上しないとか悪評さくさくだった。落とし穴はいくつもあった。誰もが熱流動はコンピュータ・シミュレーションに乗ると考えたが誤りだった。余りにも複雑な体系であり、箸にも棒にもかからなかったのである。そこで断熱材をるつぼ内に挿入して熱流動論的にるつぼの大きさを変えて見た。

これが成功して蒸発効率が上昇し、関係者は「万才万才、成功した。」と大喜びし、断熱るつぼという名前さえ付けた。私は苦り切った。断熱材がしっかりしていればしている程、断熱が効き、断熱材内外面に大きな温度差を生ずるから、このため断熱材にクラック

が入り溶融ウランが浸透して、最後には損傷を受けてしまう。私は、「不要なものをつけるのはエンジニアの恥だ」と言って断熱るつぼを拒否した。開発着手の9年目のことである。それから1年、関係者は鬼専務理事の冷酷な態度にめげず、遂に断熱材なしの、すっきりした蒸発系を完成して、安定的に蒸発を持続させた。もちろん、経済性評価の前提となっている高い蒸発効率をほぼ実現した。私はホッとした。

3. レーザー照射

レーザー装置の開発はレーザー物理の問題である。私が大学にいた頃、レーザー物理はまだ教えていなかった。(私はレーザー工学という方が適当ではないかと思う。) レーザー装置の開発も当初は、色々問題があったが、比較的順調に開発され、10年経った今、殆ど商業レベルに近づいたと判断している。逆に言えば、レーザーの開発が比較的容易であるという点が、原子レーザー法の長所の一つと言える。以上はハードウェアの話である。

ウラン原子にレーザーを照射するのは、光と原子との相互作用を起こさせる事である。つまりこれだけは量子力学を避けて通ることは出来ない。日本の重電メー

カーも量子物理屋は全社で数える程しかいなかった。しかし量子力学は今迄人類が生み出した最も確実な理論であり、特に光と原子との相互作用を扱う量子電気力学は、実験値より計算値の方が精度が高いと言われる分野である。開発着手後3～4年で量子力学的計算コードが出来上がった。但し、ウラン235の光の吸収スペクトルは超微細構造を持ち、一本の吸収線が多数の微細な吸収線に分裂してしまう。そのため、どうやって有効にウラン235に光のエネルギーを吸収させるかが問題となった。問題解決を検討する際には、一時的に私一人、孤立無援の状況になったが、最終的には関係者とのねばり強い議論の結果、この問題は解決された。光と原子の相互作用では、まだ長距離伝播のシミュレーションを検証する問題が残っている。

又レーザーの出力だけでなく、レーザーの光の質（ビームクオリティ）が重要であり、これがウラン235のイオン化率（電離率）に効くことを強調した。これは、スタンフォード大学のシエグマン教授の厚い本を勉強して判ったことであった。レーザーの専門家は光質の重要性は知っていたに違いないと思うが、皆、出力アップに熱中していた頃だったから光質まで考える余裕がなかったのだらうと思っている。

長距離伝播による光質劣化のシミュレーション解析を除き、レーザー照射の問題は意外と早く決着をした。つまり、「理論」で解決できるウエイトが高かったためである。

4. イオン抽出の電極体系

この問題も難解だった。或る時期、米国は電磁的にイオンを抽出するというペーパーを出したが、執筆した弁護士の手書き間違いであり、「静電的に抽出することだと判った。英国は電磁的にイオンを捕集すると明言した。事実、英国の有名なプラズマ研究所が開発に参加していたのである。プラズマという専門用語は大学の時に聞いたが、私の在席した電気工学科では、当時、プラズマ物理は教えなかった。従って、私にはどちらが正解なのか判らなかったのである。ある人からカリフォルニア大学のチェン教授の本を紹介して貰って読んだ。何ともトリッキーな学問だと思った。そこで日本でも、電磁的抽出法を少し研究し、静電的抽出か電磁的抽出かを判定することに決めた。

一方プラズマをシミュレーションするためのモデルは、粒子モデルと流体モデルとがあった。原子レーザー法では、光生成プラズマは平均1000m/sで電極の間

をすり抜けてしまうから、その間に速やかにイオンを電極に引き付けなければいけない。現象としては相当速いと言うべきである。このような現象に流体モデルは追従できるのかどうか不安だった。ところが、開発に着手して5年位の内に、この二つは明確になった。電磁的抽出は静電的抽出より決定的に優れているとは言えないとの研究結果が、まず得られた。続いて英国は、電磁的抽出は失敗したと言って来た。従ってイオン抽出は、静電的方法つまり、静電場で引っ張ることに決定した。一方プラズマモデルは液体モデルで十分ということも判明した。つまり抽出方法もプラズマモデルも決まったのである。

しかしそれからいけなかった。我々の電極体系は遅々として開発が進まず10年目を迎えた。蒸発系は既述の通り10年目の早い段階で成功するだろうと予想した。従って何とか電極の開発を片付けたいと思ったのである。8年目頃からレーザーの照射方法について新しいアイデアが出た。更に昨年早々開発担当のメーカーから電極の独創的なアイデアが提案されたのである。私はその頃体調が悪く疲労困憊していたが、メーカーからの提案は珍しい事なので非常に喜んだ。しかし、メーカー提案の電極体系では、イオンを十分抽出できないだろうと予想した。また、今迄9年間に渡る研究から、電極体系は、近似的にはプラズマ物理を使わなくても取扱えるという事がボンヤリと判っていた。

そこで私は、自分の専門分野の電気工学の知識内でこの問題をアタックすることに決めた。頭を使って何とか最後の牙城を抜き、米国に追いつきたいと考えたのである。昨年2月～3月頃に大体の構想を描き、4月に入って一週間程毎晩眠らないで集中的に考えた。そして頭の悪いロートルの私が体を壊し大病にかかるのを神様はきっと可哀相だと憐れんでくれたのに違いない。4月の花見の前に疲れ切った身体を少しでも休めるため、ぬるい湯で長風呂につかっていた私が、風呂を出る瞬間、神様は私に啓示を与えてくれた。「私の考えた電極体系以上にイオンを十分抽出する体系はない。従ってこれは究極の電極体系であり、正解に違いない。」ということが判ったのである。その後、半年経って担当のメーカーは2次元シミュレーション・コードでこの電極体系であれば、低い印加電圧で100%のイオンを抽出できることを示してくれた。こうして初めて関係者に出しても恥ずかしくない第4次商業機設計の担保が取れた。

5. 商業機の経済性

経済性の評価は2年半程前から始めた。不思議な事に、経済性評価を進めるにつれて、どの開発課題がどれ位経済性に効くかが明確になり、それが開発を重点的に促進することになった。

一昨年12月、濃縮原価の中間試算結果が出て来た。内容を見ると、建物や附帯設備が全建設費の50%以上となっていた。これでは先端技術の経済性が出る幕がない。日本の流通機構のプライスが勝負が付いてしまう。それにこんな馬鹿な話はないと大いに怒った。専門のコンサルタントにも積算をさせ、やっと全建設費の1/3位に落ちついた。さて、最近の世代の人達は英語をやらないので、私は海外調達の見積徴集に力を入れた。真空容器、ペローズ等は圧倒的に海外の方が安いからであった。昨年2月スポンサーに説明すべく、第2次商業機設計に基づく経済性評価が出た。今度は肝心の分離セルがマンモスのように巨大となっており、全建設費の40%以上を占める事が判った。私はこの時点で、日本の原子レーザー法の開発は遂に失敗に終わるのではないかという絶望的な気持ちになった。それから毎日のように関係者と協議を続け、5月中旬には、新しい設計がメーカーから組合に提出された。それをねり上げて10月末やっと第4次設計が固まり、11月その経済性評価を出した。この間、分離セルは相当圧縮されて中型となり、又それを新型電極が支えることにより、製品濃縮度5%、廃品濃度0.12%を達成可能とした。もちろん、経済効果は、海外調達を含めるとかなり上がり、国際濃縮価格の7割程度という濃縮原価を得るに到った。

今後は、第4次商業機設計の主要パラメータを実証確認する方向に重点が移るだろう。

6. 技術開発の大型プロジェクトを成功させるには

以上のように10年間の開発は、波乱万丈であり、紆余曲折を経た。前項末に記した通り、今後は若干の開発項目は残すものの「商業機設計の実証・確認の段階」である。恐らく、本研究組合のように、なりふり構わぬ技術開発をした所は日本では殆ど無いのではないかと。また原価とは言うものの、人件費、諸物価が世界の水準から著しく高価な日本で国際価格に競争できる高い経済性を実現できたという点も、恐らく他に例を見ないのではないかと思われる。しかし、技術開発には常

に落とし穴が待ち構えている。ここ10年間の苦い経験を基にして大型プロジェクトを成功させるための要点を、私の反省を含めてまとめて見た。

1. 組織・開発体制

大組織は失敗の因である。百害あって一利もない。

開発する技術全体を幾つかの専門分野にわけ、これをカバーできる数人(せいぜい半ダース)のプロジェクトマネジメントのプロを選ぶ。唯一人のマネージャーが責任を負う。

2. 開発のプロ根性

大学でも教えていない。(金銭感覚と言うか経済観念の発達している人間。金銭感覚の無い人間にやらせれば失敗は間違いない。)自分の専門分野以外でも人の言うことを理解できる柔軟な素質が不可欠。そうでないとプロジェクトマネジメントが出来ない。自分の専門分野について言えば、基礎から実用迄の経験を持つことが望ましい。原子レーザー法のようなサイエンスが密接に関係するプロジェクトでは、それはなかなか難しい条件だから或る段階で、研究者から実用技師にバトンタッチする過程があるだろう。

しかしできれば人は一気通貫がよい。開発のプロは、区切りがつく迄は交替しない。普通の会社のローテーションに乗らない。(これができないことが日本で零から出発した開発プロジェクトが成功しにくい理由である。)

3. 決定のメカニズム

大型プロジェクトならば、多数の研究契約を外注する。但し、開発の方針決定は、プロジェクトマネジメントの中で即戦即決する。責任はプロジェクトマネージャーが負う。特に開発上の失敗の処置、方針の変更は敏速に行う必要がある。「改むるにはばかることなかれ」である。

4. 「技術開発は子供を育てるのと同じだ。」

赤ん坊、幼児、子供、青年とわが子の育成は時代と共に変わる。技術開発は育児と全く同じである。百年一日の如き開発態度はプロジェクトの死あるのみである。

5. 海外調達

もしも開発製品が色々な要素から成っており、その要素は既製品である場合は、経済性向上に対する断固たる態度が肝要である。人件費高、物価高の国内で調達することを考えているプロジェクトマネージャーは落第である。日本の経済構造は、すべての先端技術の経済的優位すら呑みほし、薄めてしまう。仕様を決定

し、品質、納期、規格等に注意しつつ海外の安い機器を購入しなければならない。そのためには、欧米の商習慣を知っており、外国語に堪能な人材が要る。また、「大型プロジェクトの経済性は、開発行為の中にビルト・インされる」という信念を持っている。開発が終わってから商業設計をやり経済性の向上を図るという方針は頂けない。技術の経済性は、開発が終わった時点で既に勝負が付いていると考えられる。

6. 体力、頑張り

開発も最後は体力勝負、頑張りかもの言う。何等のスポーツ・運動をやるように奨励している。汗を流すと頭の巡りも良くなる。

7. 気分転換

スポーツはこの面でもよい。文学、絵画、音楽、パソコン等何でもよい。気分転換の出来る人は開発に強い。一つのプロジェクトをずっとやるようでも、実はマルチ型人間がなくてはならない。

8. 袷を取れ

普段から、「悪い話は早く持って来い」と言っている。今の厳しい時代、膨大な開発資金を貰いながら、「臭いものに蓋をする」では、遂にプロジェクトは収拾が付かなくなる。日本社会の妙な遠慮は開発には無用のものである。袷をとって率直にやるしかない。駄目なプロジェクトは、見極めの付いた段階で中止しなければならない。

9. 問題を突き離せ

特に第一線に立って難問に取り組んでいる研究者に言いたい。7の気分転換も関係する。時々は問題に密着し過ぎず、突き離す態度も必要。ボクサーは毎回相手との接近戦である。自分を見失い勝ちになる。負け戦なら尚更である。リングの脇で冷静に見ているマネージャの忠告に価値が出て来る。時には脇から冷静に自分の研究ぶりを観察することが望ましい。

10. 常識人と特殊人

特殊人をまさか非常識人も書けないだろう。ユニークな人と言う意味である。開発では、経理、資材、総務等の常識人は大切である。開発の中でも常識は無くしてはならない。しかし、開発の独自のアイデアがユニークな人から出ること事実である。ここが普通の会社のルーチン業務と異なる所である。又ユニークな人は、時に非常識な事も言う。私はいつも「それは面白い意見だね」といって笑って済ませます。むしろユニークな人達の意見に耳を傾ける事の方が多いかも知れない。逆に常識人から独自のアイデアが出て来ると期待するの

は無理である。この辺がプロジェクトマネージャの度量になる。常識人から当研究組合が方針を変えると、「終始一貫していない」と非難を受けたことがある。ともかく普通の会社の仕事とは人の接触面でも違うところがある。

最後になるが、独創性は日本人、日本社会等の特質だけでなく、日本の教育のやり方にも関係している様な気がする。付和雷同とは言わないが、一人が言い出すと「そうだ。そうだ。」と乗り易い傾向がある。

驚見理事長¹⁾は、「和して同ぜず」と言われたので額に「和而不同」と書いて事務所に飾ってある。

人によっては、もっと技術的内面について触れて欲しいという意見もあるだろうが、技術内容は核拡散の観点から機微になっていることもあり、技術開発の最前線については今回はこの程度に止めたい。この技術は米国や仏国も開発中であり、国際競争も激しい分野である。

最後に、「すべての付帯条件が判っていて判断を下す」のではなく、先端技術の開発では、スケジュールの点から、不十分な知識・情報下で決心を迫られる事が多い。私は、こういう時は、或る仮説を立てて判断することにしている。そして常に仮説を自己チェックし続けるのである。

それでも、私が間違っただけに皆さんに迷惑を掛けた事もある。常にプロジェクト・マネージャは自己チェックと反省がなくてはならないと自覚している。

註1)：関西電力副社長で、平成7年9月よりレーザー濃縮技術研究組合理事長。

【付記】原子レーザー法ウラン濃縮技術の概略

1 原理

原子レーザー法は、天然ウラン原子の蒸気流に色素レーザー光を照射して、ウラン235だけを励起・電離し、それを選択的に回収しようとするものである。

主な構成要素はレーザー装置とウランの蒸発・電離・回収が行われる分離装置とに大別される。(図-2, 3参照)

(1) レーザー装置は色素レーザーと、それを励起する銅蒸気レーザーより構成される。

①銅蒸気レーザー

低圧のネオンガス中で、数万ボルトの高電圧のパルス放電により銅を蒸発・励起する。銅原子はその励起単位の差で511nm(緑色)と578nm(黄色)の波長のレーザー光を発生する。

②色素レーザー

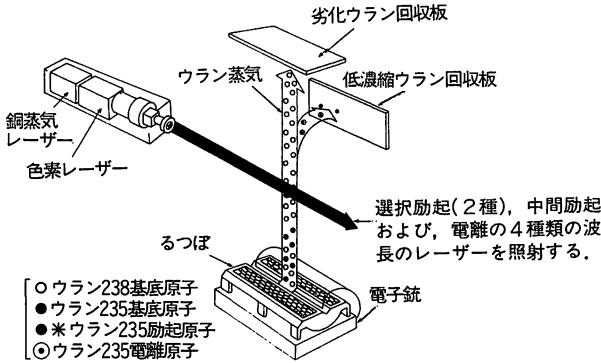


図-2 原子レーザー法ウラン濃縮原理図

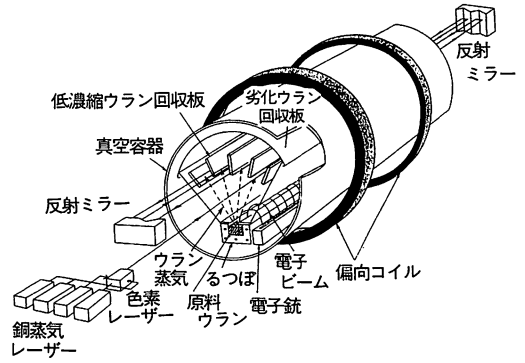


図-3 原子レーザー法設備概念図

銅蒸気レーザーの光を受けて、アルコール等に溶かした色素を励起させてレーザー発振させる。色素を選び、さらに電離に必要な特定の波長の光を選択・増幅してウラン蒸気に照射することで、ウラン蒸気中のウラン235だけを励起・電離させる。レーザーの波長は極めて高精度に制御される。

(2) 分離装置は金属ウランを入れるるつぼ、蒸発させるための熱源である電子銃、レーザーで電離したウラン蒸気を回収する回収板、そしてそれらを取りめる真空容器より構成される。

①蒸発プロセス

るつぼに入れた金属ウランを電子ビームで高温(3000K以上)に加熱し、ウラン原子を蒸発させ、原子の蒸気流を形成する。

②電離プロセス

ウラン蒸気中のウラン235の光吸収スペクトルに正確に合わせたレーザー光を照射し、ウラン235だけを励起する。励起されたウラン235原子に中間励起レーザー光、および電離レーザー光を照射し、エネルギーを高め、ウラン235を選択的に電離する。

③回収プロセス

電離したウラン235を電極上に低濃縮ウランとして回収し、電離されないウラン原子(主としてウラン238)は劣化ウランとして別に回収する。

2 レーザー濃縮技術研究組合における研究開発

(1) 第1期(昭和62年度～平成4年度)

原子レーザー法の技術的成立性の確認等を目的に、要素装置の開発を行い、平成3、4年度には年間1トンSWU(分離作業単位)規模のシステム試験装置により各種機器運転特性試験、およびウラン濃縮実証試験を行った。この一連の試験により、エンジニアリングデータの収集、スケールアップに伴う技術開発課

題の抽出を行うことができた。

(2) 第2期(平成5年度～10年度)

第1期成果を踏まえ、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ることとし、大幅な性能向上、機器寿命の向上を図ることとした。

その中での開発成果と今後の開発目標は以下のとおりである。

①レーザー装置

○銅蒸気レーザー

単機出力として目標の600Wを達成している。今後は長時間安定運転させることを主眼とする。

また、銅蒸気レーザーを4段直列に並べて増幅して、出力2.4kWを出す目標に対しては、現在2段増幅で1.2kWを達成しており、実現の見通しを得ている。

○色素レーザー

12kHzで出力1.6kW以上に相当するレベルでの高繰り返し発振を達成した。今後は長時間安定運転と、色素変換効率向上を図っていく。

また、ウラン235の電離特性を高めるため、ビーム品質の劣化を補償する補償光学装置等、レーザー光品質の維持・向上技術の開発も行っている。

②分離装置

○電子銃

出力300kWの電子銃を開発したが、今後は最適な電子ビーム加熱システムを実現することを目指す。

○蒸発回収装置

商業機を目指した大型蒸発試験装置を設置し、実用規模での総合的なウラン蒸発試験を実施する。

また、構成材料として、高温・高真空下で腐食性の高い液状ウランに耐えうる耐腐食性材料の開発を引き続き進めるが、低コスト化についても十分な考慮を払うこととする。