

加速器駆動核変換用加速器への要求と開発の現状

水本 元治*

The requirements and R&D status for accelerator used in ADS (accelerator-driven transmutation system)

Motoharu MIZUMOTO*

1. はじめに

原子力発電所の運転により発生する使用済み核燃料中には、ウランやプルトニウムの核分裂の結果生じる核分裂生成物 (FP: Fission Product) や中性子の吸収によって生成されるマイナーアクチニド (MA) などの核種が含まれている。これらの核種は、高レベル放射性廃棄物 (HLW: High Level radioactive Waste) として長期に渡って人間環境から安全に隔離することが必要とされるが、その処分の信頼性の確立や、安定した処分場の確保などについては様々な課題を抱えている。これらの課題を解決しかつ処分場の負荷を低減することを目的として「核種分離・核変換 (分離変換) 技術」が提案され、関連の技術開発が行われてきた。分離変換技術では、HLW をいくつかのグループに分離しその性質に応じて処分の方法を合理化する。また HLW 中の半減期が数千年を超える ^{99}Tc や ^{129}I などの長寿命核分裂生成物 (LLFP: Long Lived Fission Product) や、 ^{237}Np , $^{241,243}\text{Am}$ などの MA 核種については、核種変換によって安定核あるいは短寿命核に変換する。図 1 には分離変換技術の導入による HLW の毒性低減の様子が、分離の効率 90%~99.9% ごとに示されている¹⁾。99.5% 以上の分離効率と核変換が達成されれば、おおよそ、1000 年後には LLFP および MA の核種の毒性は、原料とした天然ウランが有する毒性を下回ることが期待される。

長期に渡って高い放射性毒性を有する MA は、核分裂反応を利用して核変換 (燃焼) することが有効であるとされている。これらの核種は 100 keV 以上の高エネルギー中性子領域に高い核分裂反応の確率を有することが知られているため、MA の核変換システムでは高速中性子炉を利用するのが効率的である²⁾。

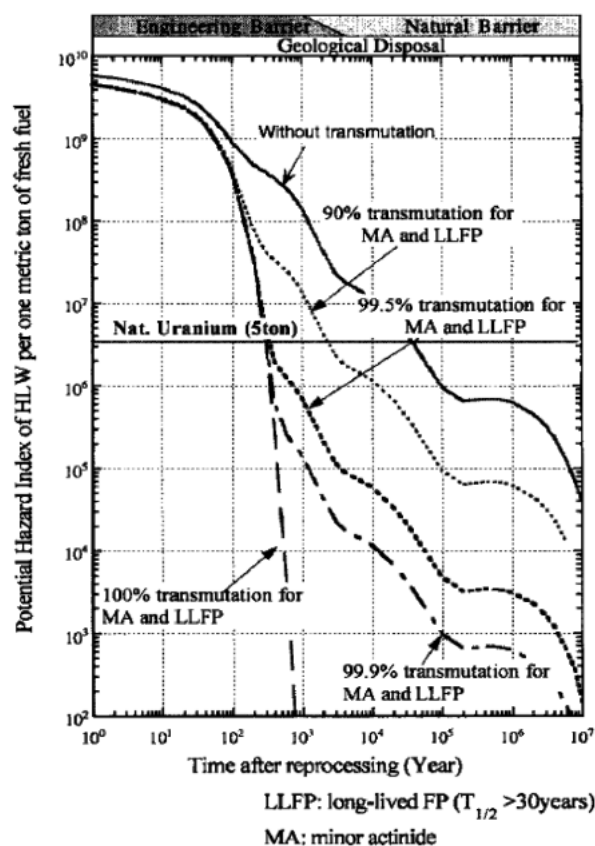


図 1 分離変換による長寿命核種の放射性毒性の低減

一方、高速中性子を用いて MA を燃焼させる核変換システムでは、MA を大量に含む核燃料で効率の良い燃焼を行い、併せて炉の安全に対する裕度を確保するという観点から、炉心体系を未臨界に保ったままの未臨界システムが提案されている。この未臨界炉システムにおいては、核分裂の連鎖反応を維持するために、大強度陽子加速器を用いて陽子を高エネルギーに

* 日本原子力研究開発機構

加速し、核破砕反応によって大量に発生する中性子源を利用する「加速器駆動未臨界システム (Accelerator Driven subcritical System: ADS)」が提案されている。ADS では、また併せて MA の核分裂により発生するエネルギーを利用した発電も同時に行うことが考えられている。

2. 加速器駆動核変換システム ADS

2.1 システムの概要と MA の核変換

加速器による中性子源と未臨界炉心で構成される ADS では、未臨界炉心の MA の燃焼の割合を示す熱出力 P は、中性子源強度 Q と体系の未臨界増倍率 k_{sub} で以下のように決まる。

$$P = A \cdot Q \cdot \frac{k_{sub}}{1 - k_{sub}} \dots (k_{sub} < 1)$$

ここで、未臨界増倍率 k_{sub} はシステムの規模を決定する最も重要な量の一つで、通常原子炉で用いられる実効増倍係数 k_{eff} に近い値を取るが、加速器による核破砕中性子源の空間分布、エネルギー分布及び角度分布に依存する。また、 A は比例定数で、次式で表される²⁾。

$$A = W/\nu$$

ここで

W : 核分裂当たりの放出エネルギー、

$$W = 200 \text{ MeV} = 3.2 \times 10^{-11} \text{ J}$$

ν : 核分裂当たりの平均中性子発生数、 $\nu = 2.5 \sim 4$

この式から、例えば、 $\nu = 3$ として、 $k_{sub} = 0.97$ の場合に 800 MW の熱出力を得るためには、 $2.3 \times 10^{18} \text{ n/s}$ の中性子源強度が必要となる。このように強力な中性子源を得るためには、発生中性子当たりの投入エネルギーが少なく、かつ、中性子発生部領域での除熱の負荷が少なくすむ中性子源が不可欠である。加速器によって加速された粒子によって中性子を発生させる反応には様々な反応があるが、 10^{18} n/s もの中性子源強度を得るためには、核破砕中性子源が最も効率が良く、その他の反応、例えば、 $T(d, n)$ 反応などの軽イオン入射反応や電子による制動輻射線を用いた $W(e, n)$ 反応などの光核反応では不可能である。

1 GeV のエネルギーを持った陽子が Pb 等の重い金属に照射された場合、一つの陽子で凡そ 30 個の中性子を発生させるため、 10 mA の陽子ビームの中性子発生量は、 1.9×10^{18} ($10 \times 10^{-3} \div 1.6 \times 10^{-19} \times 30$) ($1 \text{ A} : 1.6 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$) となり、上記の条件が満たされる。 200 MeV 以上の陽子による中性子の発生率は $1 \sim 1.5 \text{ GeV}$ 程度のエネルギーが最も高いことが知られているが、提案されている ADS システムの加速器エネルギーはその他の様々な他の要件によっても影響される。 800 MW の熱出力の未臨界炉に必要な加速器では、 1 GeV 、 12 mA のビーム出力 12 MW 程度のビーム出力が必要であることがわかる。

図 2 に核変換システム ADS の概要を示す。このシステムでは、年間 250 kg の MA を核変換することを想定している。電気出力 100 万 kW クラスの原子力発電所では年間約 25 kg の MA が生成されるため、

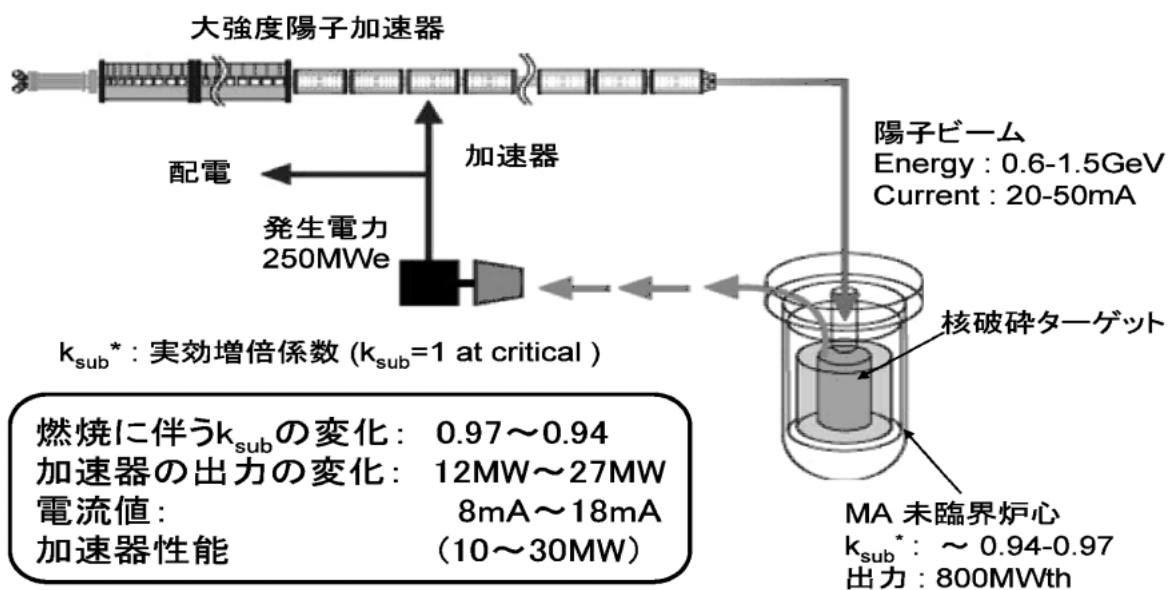


図 2 加速器駆動核変換システム (ADS) の概要

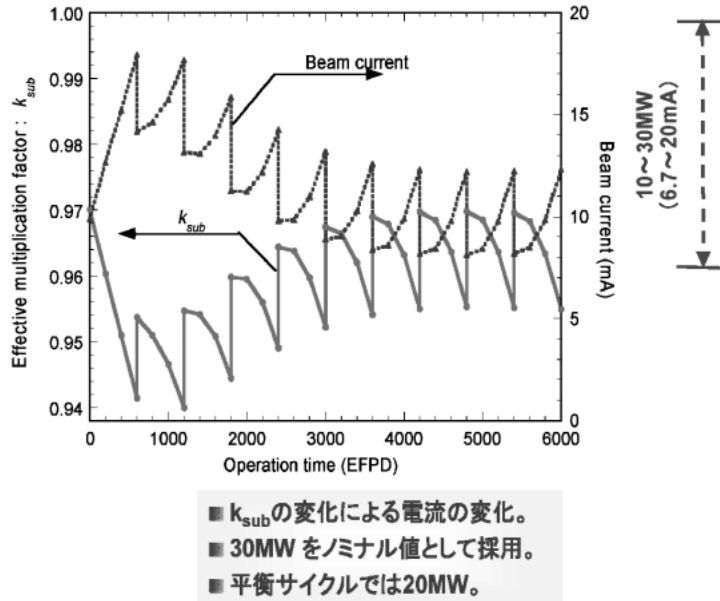


図3 ADSの k_{sub} の変化と必要な加速器出力

このシステムでは大凡10基の原子力発電所からのMAを処理することが出来る。現在国内には50基以上の原子力発電所が稼働しているため、将来は、全部で4~5基のADSプラントが必要となる。後述するように、このシステムは、30 MWクラスの大強度陽子加速器と800 MW熱出力を有する未臨界炉システムより構成されており、加速器の稼働に必要な電力は30%位の効率で運転することが出来、かつ未臨界炉の発電効率を大凡30%とすれば、加速器の運転に必要な電力が90 MW、発電能力が240 MWとなり、自分自身で発電する電力で加速器の運転が可能となる。

図2で示されているように k_{sub} の値に0.94~0.97まで幅を持たせてあるが、それは k_{sub} の値がMAの燃焼によって変化することによる。図2のシステムでは、燃焼初期の k_{sub} の値を0.97とし、一定の熱出力800 MWthを維持するためには k_{sub} の減少に伴って加速器の出力を12 MWから27 MWまで変化させることが必要となり、加速エネルギーを1.5 GeVとした場合、加速電流値は8 mAから18 mAとなる。

図3に原子力機構で開発されたADSの設計コードシステムATRASを用いて計算された燃焼に伴う実効増倍係数 k_{sub} の変化とそれを補うために必要な加速器出力の変化の具体例を示す(横軸: EFPD: 定格出力運転日数 Effective Full Power Day)。この例では600EFPDで燃料を交換し、新しい燃料を装荷することとしている。一サイクル(2年間)で凡そ500 kgのMAが燃焼し、7~8サイクルを経て定常状態とな

っている³⁾。

2.2 長半減期FPの核変換

FPを核変換させる場合は、中性子を吸収して他の原子核に変換する捕獲反応を利用する。一般的に中性子捕獲断面積は熱中性子エネルギー領域の方が大きい。FBR(高速増殖炉)やADSといった高速中性子炉を用いる場合にはZrH化合物等の中性子減速材をFPに隣接させて使用する必要がある。捕獲反応断面積の値やHLW中の同位対組成などの観点から現実的に核変換が可能な核種は、 ^{129}I と ^{99}Tc の二核種とされており、ADSで長寿命FPを核変換する際には、MA燃料の上下及び外側にFPと減速材からなるブランケット領域を設けることになる。ADSシステムで年間変換されるMAの総量250 kgに見合う ^{129}I と ^{99}Tc は57 kgと233 kgであるとの評価があるが⁴⁾、ヨウ素の変換にはこれらの領域に約2tのヨウ素を装荷すると57 kgの核変換が可能であるとの解析結果を得ている。一方、 ^{99}Tc も同時に233 kgを核変換するのは困難であることが分かっている。また、FPは照射するにつれ密度が低下するので、適切なサイクルで取り出し、再成形、再装荷する必要がある。

3. ADSシステムの概要

3.1 典型的なシステム構成

図4に典型的な未臨界炉システム構成の概要を示す⁵⁾。加速器施設は放射線の遮蔽を考えると地下に設置されこととなる。そのため、この設計では、未臨界

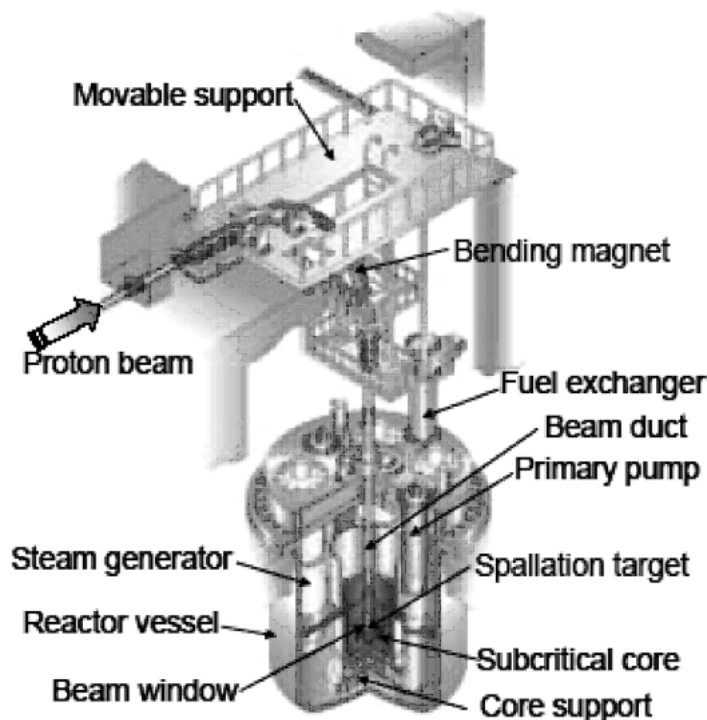


図4 核変換システム ADS の構成

炉は更に深い地下（～40 m）に設置されることとなる。図に示すように加速器から出た陽子ビームは偏向磁石の組み合わせによって垂直方向に曲げられ、ビームの半径約 20～30 cm（ 2σ ：半値幅 23～35 cm のガウス分布を仮定）に拡大された後、未臨界炉システムにビーム窓を介して入射される。未臨界システムと加速器の間の空間には燃料交換系、放射線の遮蔽、冷却系などの様々な配管系などの 20 m ほどのスペースが必要となる。

大量の中性子を発生する ADS 用中性子源（ターゲット）には、鉛、タングステン、タンタル、ウラン等の重金属が使用されるが、材料や生命科学的研究のための中性子源ターゲットとして利用される水銀は沸点が 357℃ と低く、中性子捕獲断面積も大きいことから ADS 用のターゲットとしては除外される。また、前述のように、ADS は高速中性子系のものが考えられており、炉心を冷却するための材料として、ナトリウム、鉛ビスマス、ヘリウムガス等が候補として考えられている。ナトリウムは冷却性能に優れ、高速炉での使用経験も豊富であるが、化学的活性が高く、沸点が 883℃ で比較的低いことなどが不利な点となる。一方、鉛ビスマスは、冷却性能の観点ではナトリウムに劣るが、化学的活性が比較的 low、沸点が高いことから、ADS だけでなく中小型高速炉の冷却材としても

注目されている。さらに、鉛ビスマスはそれ自体中性子を発生させるターゲットとしての機能を持たせることも可能である。また、ヘリウムは、ポイド反応度や材料腐食が問題とならないこと、化学的に安定であること等の長所を有するが、高圧となるためビーム窓などの構造強度の確保が重要となる。

3.2 核破碎ターゲットシステム

ADS 用ターゲットシステムには、現在、鉛ビスマスの共晶金属を用いることが考えられている。鉛ビスマスは比較的低い温度（124℃）で液体になり、沸点（1670℃）はかなり高い。また、熱中性子領域での捕獲断面積が低く（0.10b）、さらに、前述したように発生する熱を冷却するための材料としても同時に用いることが可能となる。一方、鉛ビスマスによる鋼材腐食は、500℃ 以上で激しくなることが知られており、また、鉛ビスマスによる鋼材の壊食を防止するため、冷却材としての機能を持たせる場合、液体の流速を 2 m/s 程度までに抑制する必要がある。現在、鉛ビスマスを用いた高出力核破碎ターゲットの技術実証を目指して、スイス PSI の SINQ 中性子源を用いた MEGAPIE (Mega Pilot Experiment) プロジェクトが進行中である。これは、スイス、フランス、ドイツ、イタリア、ベルギー、日本、米国、韓国の共同プロジェクトで、2006 年に 1 MW のターゲット試験を予定

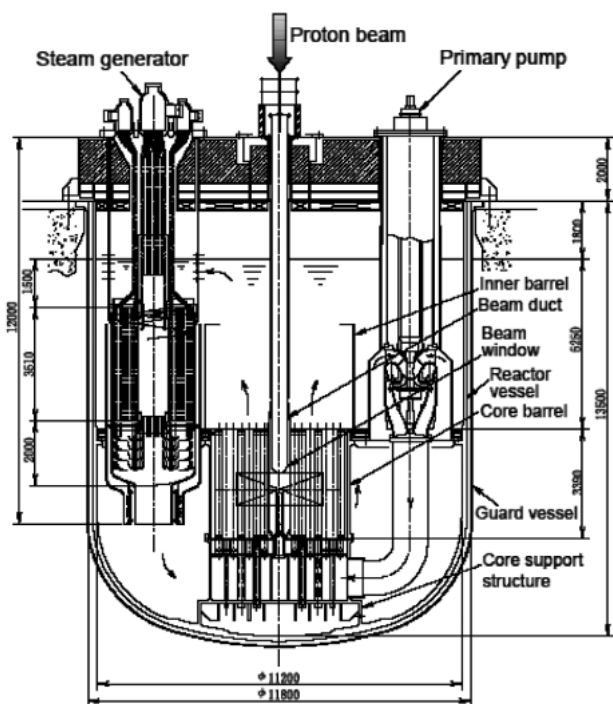


図5 ADS用炉心の構成 (タンクタイプ)

している。

3.3 未臨界炉心のシステム

図5に炉心部分を拡大したものを示す⁵⁾。提案されている未臨界炉は、所謂タンクタイプと呼ばれているもので、鉛冷却高速炉で提案されているものと同様に、炉容器タンクの中に液体鉛ビスマスを循環させるポンプを配置し、かつ、発電に供するための蒸気発生器も装備している。通常の原子炉では、炉心の冷却性能及び燃料の燃焼度を最も出力密度の高い部分に合わせて設計する必要があるため、核分裂反応の空間分布、すなわち出力分布をできるだけ平坦化することが行われている。一方、ADSでは、炉心の中心に中性子源が存在する未臨界体系であるため、中性子源近辺の出力密度が大きくなってしまふ。炉心全体の平均出力と比べて、ターゲット近傍では約2倍近い出力密度となってしまう。これをさけるために、ターゲット近傍の燃料を低密度化したり、ビームのターゲットに照射する領域を上下させて最適化するなどの対策が検討されている。

また、通常の原子炉において、安定な運転に欠かすことのできない実効遅発中性子割合は、軽水炉で0.7%、高速炉で0.4%程度であるが、MA炉心からなる核変換専用のADSでは0.2%程度と小さいことが予想されている。さらに、核変換専用のADSでは、不安定な事態になることを回避する負の反応度フィード

バックが小さいため、体系を十分な未臨界状態に保つことが重要である。想定されるいかなる場合でも臨界を超えないように未臨界度 ($1 - k_{\text{sub}}$ で定義) がゼロにならないようにする必要がある。一方前述したようにMAの燃焼量を一定にした場合、中性子源強度 (加速器の出力) と $k_{\text{sub}} / (1 - k_{\text{sub}})$ は反比例の関係にあるため、 k_{sub} が1より小さく (深い未臨界) になればなるほど比例して大きな加速器出力を必要とする。 k_{sub} を予測するのに必要な中性子核データなどの設計データおよび計算コードなどの設計手法の精度はそれぞれ1%程度であると見なされており、これらを勘案して提案されたシステムでは k_{sub} の最大値を0.95~0.98と設定している。さらに、運転中の未臨界度の測定については、これまでの未臨界度測定手法は、核燃料取扱施設などで臨界に達しないようにすることを確認する目的で研究開発されてきているが、ADSのように未臨界で運転する体系で外部の中性子源のある場合の精度の良い測定手法を確立する必要がある。

4. ADS用大強度陽子加速器への要請

4.1 加速エネルギーと加速電流

核破砕中性子の発生効率は陽子のエネルギー1.1 GeV近傍が最も高いといわれているが、中性子発生個数 N_s は大凡エネルギーに比例する式 $N_s = (E_b - 0.12) \times (A + 20) \times 0.1$ (E_b : Beam energy in GeV, A: Target mass) で表すことができる⁶⁾。そのため、同じビームパワーであれば、加速エネルギーを上げても、ビーム電流を増加させても同じ効果をもたらす。通常陽子ビームのエネルギーが高く加速電流は低い方が、ビーム窓などへの熱負荷や照射損傷を低く抑えることができる。一方加速器の建設コストは、一般に加速器の長さに向うところが大きく、エネルギーを高くすると建設コストの増加をもたらす。現在提案されているADSシステムの実用機では1 GeV~1.5 GeVのエネルギー範囲のものが多く、また、実証試験のための装置としては600 MeV規模のものが検討されている。

さらに、全体としてエネルギー収支 (加速器の運転に必要な電力とADSシステムが核分裂エネルギーによって作り出すことができる電力) を正にすることが望ましいため、加速効率を高くする必要がある。システムの最も小さな k_{sub} の値 $k_{\text{sub}} = 0.94$ の場合には800 MWの熱出力を得るのに約30 MWのビーム出力が必要であるが、先に述べたように800 MWの熱出力の場合、発電効率を30%として240 MWの電気出力が得られるので、約13% (30/240)の加速効率でADS全体のエネルギー収支が釣り合うことになる。

この際、ビームエネルギーを高くして、加速電流を減少させるオプションも考えられるが、この場合にはRF源の電力効率も低下することになる。これら、様々な要因を勘案して、目的に応じた最適なエネルギーと加速電流の組み合わせを検討していく必要があり、これまでの原子力機構の提案では1.5 GeV、米国、欧州のものは1 GeVである。

4.2 ビーム入射部とビーム窓

陽子ビーム加速管部から、核破砕ターゲット部に導く場合両者の間に何らかの隔壁が必要であり、この隔壁として最大30 MW規模の陽子ビームが透過するビーム窓を設置する必要がある。液体ターゲットの場合、ビーム窓の一面は高真空であり、もう一方の面は高温の液体金属流体に接することになるため、ビーム窓は非常に苛酷な環境下で使用されることになる。ビーム窓の設計に際して以下のような項目の検討が必要とされる⁷⁾。

まず、熱的観点から、陽子ビームが透過する際の発熱を抑制するためビーム窓はできるだけ薄い方が有利である。また、陽子ビームにより発熱するビーム窓の冷却の役割を果たさなければならないため、鉛ビスマスの流量、流速などの効率的な設計が図られなければならない。照射損傷の観点からは、高エネルギーの陽子と中性子による過酷な照射条件により、10~20 DPA (Displacement per Atom) 程度の照射でビーム窓が損傷を受け交換が必要となる。ビーム窓の交換を1年に1度程度の頻度に抑制するには、陽子ビームの電流密度を30 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度以下とする必要があるとされている。さらに、ビーム窓には、周りの鉛ビスマス(密度: ~10 g/cm^3)による圧力、鉛ビスマスの流力抵抗、発熱による応力等の様々な力が作用するため、これらの応力に対して寿命中のいかなる場合でも構造強度が十分確保されている必要がある。この観点からは、前述の熱的観点とは相反する方向であるが、ビーム窓はある程度厚くする必要はある。

炉心設計の観点からは、ビーム拡大が技術的に可能でも炉心の中心で核破砕ターゲットの占める割合が大きくなるとそれだけ中性子の漏洩が多くなり、実効的な中性子源強度が低下してしまう恐れがある。従って、ビームの半径(2σ)は25 cm程度以下に抑制する必要がある。これらの様々な条件を考慮して、現在、ADS用のビーム窓として直径470 mm、厚さ2 mm~3 mmについてその成立性が詳細に検討されている。

窓の熱負荷については、ビーム密度の分布によるところが大きく、上記の検討では、最大の負荷を与えるガウス分布を仮定した設計計算が行われている。しか

し、将来、ビーム拡大装置により、より平坦化されたビームの実現が可能となれば、ビーム窓への負荷の大幅な低減をもたらすことができる。

その他、未臨界原子炉の構造の面からは、陽子ビームが炉容器内に導入される部分の結合の問題がある。炉容器の部分と加速器の部分を一体的な剛構造とするには大きすぎると考えられ、どの部分かにエキスパンション・ジョイントを設けて、両部分の変位を吸収してやる必要がある。しかし、陽子ビームの加速器や輸送系にはビームの質を維持し、ロスを低減するために0.1 mm程度の据え付け精度が要求される。耐震などへの対応を含めて検討が必要である。

4.3 ADSプラントにおける加速器の制御と運転計画案

ADSの出力は中性子源強度と比 $k_{\text{sub}}/(1-k_{\text{sub}})$ に比例することを先に記した。通常、ADSを運転していると、MAの燃焼に伴い k_{sub} の値は変化していくため、ADSの出力を一定に保つのに、加速器からの出力を変化させ中性子源強度を制御する。従って、ADSで新しい燃料が装荷され比較的少ないビーム電流でも原子炉の出力を一定の値に確保出来る場合には、加速器のビーム電流を最大定格よりも絞って運転する必要があり、最大定格のビーム電流が誤って入射することによる「ビーム過出力事故」の想定が必要となる。

これらの事象の発生を避けるために、制御棒などを備えて k_{sub} を一定に保ってやるオプションもあり、その場合には加速器は常に定格出力で運転することも可能と考えられるが、制御棒を操作する方法では、制御棒の誤操作による「反応度事故」の想定が別途必要となる。現在のところ、ADSの制御は加速器の出力制御を用いる方法が第一義的に検討されているが、ビーム電流の調整が現実的に可能かどうか、その信頼性はどうかなどについて、今後の研究開発が必要な事項である。

また、通常原子炉では、定期的な点検作業などが終了して、フルパワーまで出力を上昇させる際、あるいは、定常的なプラント停止、また何らかの理由でパワーを停止させる際には、急激な出力の変化による原子炉容器や炉構造部品への急激な熱応力が掛かることを避けることが重要である。FBRの運転経験から、プラントの通常起動・停止の際の温度変化率を約25 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 以下と設定して、ADSプラントの起動・停止時の手順が提案された。図6に示されている様に、これらの出力制御は、基本的には冷却材の流量の調整とそれに連動した陽子ビーム出力の調整等によって行われ

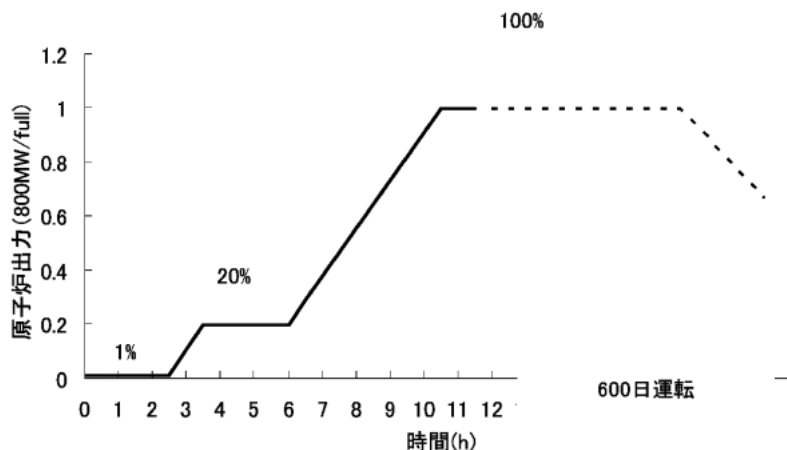


図6 原子炉の起動時の出力上昇運転案

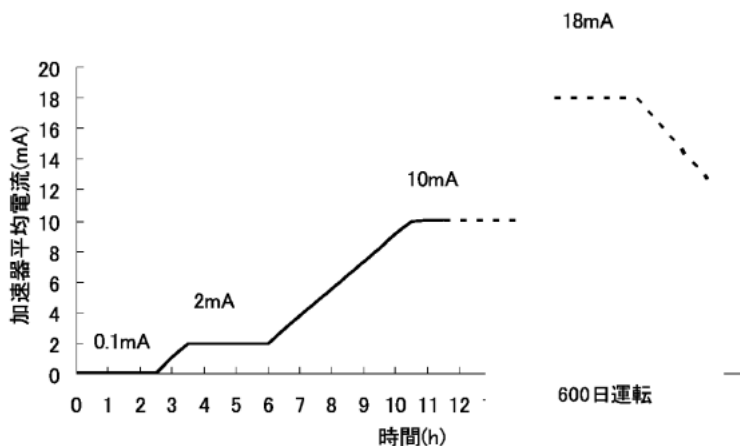


図7 ADS プラント起動時の加速器運転立ち上げ計画案

る。検討の結果では、最終的に原子炉がフルパワーで運転され、発電を行うタービンが定格の回転数まで上昇するのに約10時間を要するとされた。

一方、加速器ではその運転パターン（原子炉の出力、冷却材の温度等）に合わせ、図7のように、10時間でビーム電流を0.1 mA から10 mA までステップ状に増加させる。その後、燃料の燃焼度に合わせて、原子炉の出力を一定に保つために、 k_{sub} の低下を補償するように加速器の出力を徐々に増加させ、最終的に加速器の最大定格に近い1.5 GeV、18 mA の加速電流とする。また、1サイクル (EFPD) 600日の運転が終了し、燃料交換や保守のために原子炉を停止する場合には、起動時と同様に徐々にビーム電流を減少させる。

このように加速器側のビーム電流の調整範囲が2桁にも及ぶため、CWビームによるビーム電流量の調整だけでは困難であり、ビームをパルス化してその

ビーム幅や繰り返し（デューティ）を変化させることによる出力調整などが必要となる可能性がある。例えばパルス化によるビーム電流の調整方式として、RF源はCW運転を維持したまま、ビームのみをイオン源でのパルス化、下流のチョッパー装置におけるパルス幅や周波数の制御等が考えられている。

5. ADS用陽子加速器開発の概要

5.1 ADS用大強度加速器

これまで、大強度陽子加速器として、線形加速器（リニアック）を前提として説明してきた。しかし、加速器施設規模（コスト）の低減のためには、サイクロトロンやシンクロトロンなどの円形加速器を利用する可能性も考慮する必要がある。しかし、シンクロトロンについては原理的にパルス運転とならざるを得ず、加速可能なビーム出力が限られ、数10 MWのビームを得ることは困難なため、現在のところADS

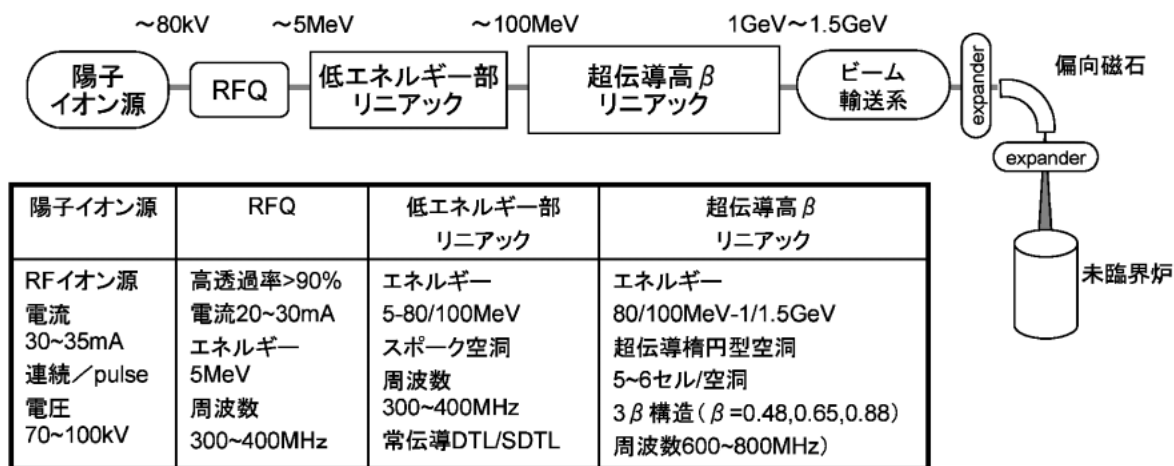


図8 大強度陽子加速器の構成と基本仕様

用加速器には不向きである。また、サイクロトロンについては、これまでに数度に渡りリニアック、サイクロトロンの専門家が集まった会議が開催され、個々の技術的な課題についての議論が行われた。結論としてサイクロトロンでは大電流加速の際のビーム引き出し部でのビームロスが大きくなりすぎるおそれがあることから、10 MW を超えるような大出力加速器は困難であると考えられている（詳細な議論は文献を参照⁸⁾）。しかし、数 MW のビーム出力でも運転が可能な 600 MeV クラスの実験炉級の低出力のものについては、スイスの PSI リングサイクロトロンの安定した運転実績が存在することからその可能性についても検討する必要がある。しかし、実用炉級のものについては、リニアックが ADS 用の陽子加速器として最も有望であると結論つけられている。

リニアックについては、加速空洞を超伝導状態とする超伝導リニアックが、加速効率が良く、ビームの径を大きくできるためビームロスが少なく、また、加速電界を高くしリニアックとしては直線距離を短くできる等の点から最も可能性が高いとされ、各国の研究機関で研究開発が進められている。しかし、超伝導リニアックを使用してもリニアックでは長さ数百メートルに及ぶため、建設コストの低減化が最大の課題の一つと考えられている。

一方、最近、陽子ビームを周回させる磁石を固定磁場と出来るサイクロトロンの長所と、強いビーム収束が可能なシンクロトロンの長所を兼ね備えた FFA G (Fixed-Field Alternating-Gradient) 加速器の開発が、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 等で行われており、コンパクトな敷地で大電流の加速が可能になると期待されている。しかし、現在のところ、まだ、

ADS 用として必要な性能を満たすかどうかを判断できる技術的な結果を得るまでには至っていない⁹⁾。

図8には超伝導リニアックを主体とした、ADS 用リニアックの構成概念を示す。イオン源には陽子ビームを加速し平均 20 mA 以上の陽子ビームを供給する能力が要求される。イオン源を出た陽子はまず RFQ (Radio Frequency Quadrupole : 高周波 4 重極型) リニアックで数 MeV 程度まで加速し、DTL (Drift Tube Linac) などの低エネルギー加速部で 80 MeV ~ 200 MeV 近傍まで加速するのが一般的な加速器のスキームである。その後、超伝導加速部で 1 ~ 1.5 GeV まで加速する。更に、ビーム輸送系によってビームを未臨界炉心まで導くが、未臨界炉の設計に対応してビームの電流密度、サイズ等を調整するビーム拡大装置 (Beam Expander) を経て核破砕ターゲットへビームを入射する。

陽子リニアックは大電流を安定に供給する必要があることから基本的には CW (連続) ビームであることが望ましい。しかし、未臨界炉システムの起動・停止時の出力が 2 桁もの変化を安定的に実施することが要請されるため、段階的に繰り返しや、パルス幅を変化させることによってビーム出力の変更が可能なパルスビームの機能を兼ね備えていることが望ましい。一方、未臨界炉心システムの熱・応力などの時間応答の観点からは、即発中性子が減衰する時間 (高速中性子系で 10 μ s 程度) よりも十分に短ければ、実質的に連続ビームと考えて良く、ビームトリップについても第 7 節で記述するように一定の制限回数以下であれば原子炉の炉構造や機器などへ影響を及ぼすことは少ないとされている。

ADS 用加速器は大出力のビームを加速することか

ら、ビームのロスに対する条件は極めて厳しく、放射化低減の観点から 1 W/m 以上のビームロスを許容することは出来ない。現在、建設中の新世代の陽子加速器 (SNS/J-PARC) でも同様のクライテリアが定められているが、ADS 用の加速器の出力はそれらよりも一桁以上大きいことからロスの割合も一桁以上厳しいものとなる。ビーム出口のビームのエミッタンスについては、ビーム照射場での条件などにも依存するが、現在、 $0.2\sim 0.3\ \mu\text{mm}\cdot\text{mrad}$ が一般的に設定されている。加速器の運転については原子炉並みの信頼性・稼働率 (Reliability・Availability) (年間数回の計画外停止と保守・点検による停止も含めた 80% 以上の稼働率) が要求されている。

5.2 イオン源

ADS 用のイオン源からのビームは基本的には H^+ (proton) で CW のものが必要とされる。しかし、先に述べた、起動・停止時の 2 桁の出力変動に対応してパルスビームと連続ビームの 2 種類の機能を兼ね備えていることが望ましい。その他、加速中のビームのロスを極力抑制するために、エミッタンスへの条件は出口でのエミッタンスの 1.5 倍程度が想定されている。

ADS に必要とされる CW イオン源は、後の章 (世界の加速器開発の現状) で記述する米国 Los Alamos 研究所の加速器計画の LEDA¹⁰⁾ (Low Energy Demonstration Accelerator) とフランス Saclay 研究所で行われている CNRS/CEA 共同の研究計画の IPHI (High Intensity Proton Injector project) のイオン源 (SILHI)¹¹⁾ 等のプロトタイプ製作・試験が行われている。両イオン源とも高周波駆動のイオン源でありビーム引き出し部ではソレノイドレンズによる収束を行っている。イオン源の引き出し電圧はそれぞれに 100 kV と 80 kV であり 100 mA CW, 出力エミッタンスで $0.2\ \mu\text{mm}\cdot\text{mrad}$ を達成した。さらに、IPHI のイオン源では約 1 週間の全くトリップなしの運転に成功しており、これらの経験からイオン源については ADS の目標はほぼ達成されているといえる。

5.3 低エネルギー加速部

1) RFQ

イオン源からのビームを集群 (バンチ) し、併せて、収束/加速する CW 運転仕様の RFQ については、1980 代から 1990 年代にかけて様々な開発が行われた。ADS 用の CW あるいは高デューティものについて、ロスアラモスの LEDA¹²⁾、原研の中性子科学研究用¹³⁾などで試作され、サクレー IPHI¹⁴⁾、イタリア Legnano の TRASCO (TRAsmutazioe di SCOrie) 計

画用¹⁵⁾のもの等で設計研究が行われた。特に、LEDA の RFQ では加速エネルギー 6.7 MeV、周波数 350 MHz、CW 仕様のを製作しビーム加速試験に成功している。1999 年の運転では、100 mA のビーム電流で行われ、ビームのエミッタンスは x, y 方向それぞれ $0.25, 0.31\ \mu\text{mm}\cdot\text{mrad}$ で 120 時間の運転の実績がある。一方、IPHI では 3 MeV の RFQ (周波数はこれも 350 MHz) が 2006 年頃のビーム試験を目指して製作されている。CW の RF 源については、LEDA や IPHI 用に 350 MHz 1.3 MW のクライストロンが開発されている。

2) DTL

3~7 MeV 以降の RFQ に続く中間エネルギー領域では、従来アルバレ型 DTL が最も実績のあるものである。新世代の大強度中性子源用のパルスリニアックである SNS¹⁶⁾ や J-PARC¹⁷⁾ では、10% に近い高いデューティで運転が対応可能とされる DTL が建設されている。ADS で必要とされる CW 100% デューティの DTL については、過大な RF パワーの負荷によって発生する熱の除去が必要なため技術的に更なる大きな課題を有している。初期の加速器計画では、CW DTL を使用する設計が行われた。ロスアラモス研究所の APT (Accelerator Production of Tritium) 計画では、新しい概念 CCDTL (Coupled Cavity DTL) が提案され、LEDA 計画の一環としてプロトタイプの設計・製作が行われた。CCDTL は $\pi/2$ モードの DTL で、単空洞ないし側結合セルを有する数個の空洞を用いたもので、大電流を加速する際の RF の安定性を狙ったものである。しかし、実際に製作されたものについては、製作の精度が不十分であったことや冷却チャンネルの設計に不備があったことなどが原因してビームの加速までを行うことは出来なかった。

また、DTL では付随する横方向の収束要素 Q 磁石を DT (ドリフトチューブ) 内に設置しなければならず、高い加速周波数を選択した場合はそのサイズが小さくなり除熱の条件が極めて厳しい。その解決のために、永久磁石を用いたり (SNS)、コイルの巻き数を稼ぐために銅のブロックからワイヤカッティングで直接一体型のコイルのものを製作する (J-PARC) などの様々な工夫が行われているが、CW 運転についての実証はまだ行われていない。それを解決する方法として、収束要素と加速要素を分離する分離型 DTL (S-DTL) 方式については、50 MeV 以上の高エネルギー領域については可能であり、パルス装置である J-PARC などの建設に採用され、CW 運転についても可能性が検討されている。

3) 低 β 超伝導リニアック (スポーク空洞)

100 MeV 以下の低エネルギー領域の加速構造としての通常の DTL を用いない他のアプローチとして二つの提案がなされている。一つは、1/2 波のスポーク空洞などの超伝導共振器を使用するもので速度の遅い重イオン加速器などでは既に実用化されているものである。最近、ロスアラモス研究所では ADS 用に $\beta=0.175$ 領域の空洞が試作され高い表面電界 8 MV/m で $Q=1 \times 10^9$ を得ている¹⁸⁾。また、IPN Orsay では X-ADS プログラム等の一環として $\beta=0.35$ のスポーク空洞の試験が実施されており¹⁹⁾、4.2 K で $E_{acc}=10$ MV/m の成績を取めている。また、X-ADS 用リニアックでは一つのオプションとしてフランクフルト大学では低いエネルギー領域で優位とする CH (Crossbar-H) 構造リニアックが提案されている²⁰⁾。これらのどちらが有利かについては今後、R&D の結果を踏まえてさらに検討を進める必要がある。

5.4 高エネルギー超伝導リニアック

陽子の速度が 100 MeV を超え、光速度との比 β が 0.5 を超える領域では、楕円形状の超伝導リニアック空洞が採用される。 $\beta \approx 1$ の電子リニアックでは CE-BAF (L-Band (1.3 GHz) 空洞) など長年の運転実績を持っており、最近では、陽子を加速する加速器についても高デューティリニアック SNS (805 MHz 空洞) に採用され、2007 年の完成を目指してビームの加速試験に成功している。ADS 用についての開発課題の中心は、一層の安定性の向上と 30 MV/m (最大表面電界) を超える高い加速電界の達成に向けられている。更に、超伝導リニアックは、巨大な長さを有する電子・陽電子リニアコライダーの第一候補とされ

ているため、電子加速器 ($\beta=1$ の加速器) でも、同様に高効率化、高電界達成に向けての開発が進んでいる。

1) クライオモジュールの構成

超伝導陽子リニアックの加速空洞と空洞を収納するクライオモジュールの典型的な例を図 9 に示す²¹⁾。例として示したクライオモジュールは原子力機構で開発されたもので、内部に超伝導加速空洞を実装した断熱容器からなり、空洞に高周波電力を入力するための RF 入力カプラ、ビームにより誘起される高調波を外部に取り出すための高周波出力カプラ、地磁気を遮蔽するための磁気シールド、及び断熱・冷却構造としての液体ヘリウム容器、熱シールドを備えている。本開発では、周波数 972 MHz、 $\beta=0.725$ (陽子エネルギーで 424 MeV に相当) の 9 セル空洞を 2 台実装している²²⁾。

ADS 用陽子リニアック空洞の周波数は、一般的には 700 MHz を中心に 600 MHz ~ 1000 MHz 領域のものが提案されている。冷凍温度 2 K か 4 K かは、周波数に依存し、低い周波数では 4 K、高い周波数では 2 K が採用される。一個のクライオモジュールの中に何個の空洞を入れるかは、2 個~4 個などを中心に検討がなされているが、ビームを収束させるための 4 重極磁石をクライオモジュール外の常温部に設置するか、クライオモジュールの内部に設置するかによって空洞の個数の選択に影響を与える。超伝導 4 重極磁石は技術的にもコスト的にも課題があるが、一方、熱シールド領域の短縮化に寄与することが出来る。常温部の 4 重極磁石などの非加速部分が増えると加速器の長さあたりの加速効率が減少する。一般的にビー

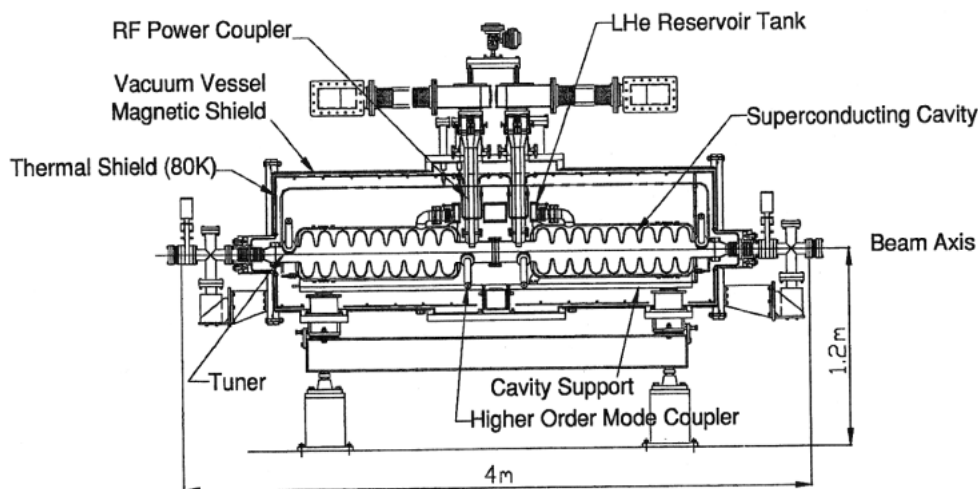


図 9 超伝導リニアッククライオモジュールの例

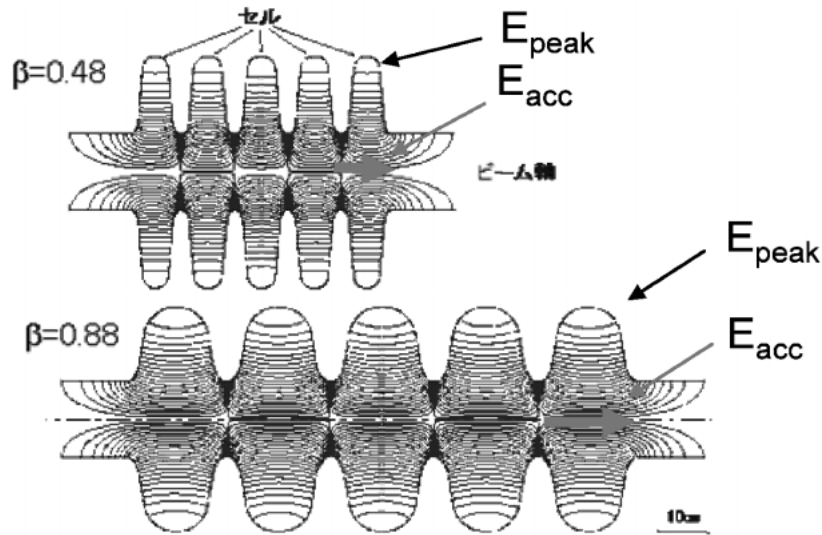


図10 超伝導リニアック空洞の形状

ムの縦方向（進行方向）と横方向の収束力を同じように調整することにより、ビームの質の低下を防ぐことが重要であるが、高エネルギー領域では縦方向の収束力が弱くなるために、空洞ごとに横方向の収束を行う必要が必ずしもないとされており、空洞あたりの4重極磁石の個数を減らす設計が行われている。SNSの超伝導リニアックでは常温のQ磁石を利用しており、低エネルギー部では、クライオモジュールあたり2個の空洞を、高エネルギー部では3個の空洞を設置している。

図10に陽子加速でのエネルギー100 MeV領域 $\beta=0.48$ と1000 MeV $\beta=0.88$ の5セル楕円空洞の形状を示す。一空洞あたりのセルの数は、加速周波数に依存するが、一般的には5~9セル位を採用する。加速周波数が高く（構造が小さく）セル数も小さい場合には全体としてコンパクトな設計とすることが可能となるが、加速領域の長さが短くなり加速の効率が低減する。また、加速セル数を多くすると、全体として機械的な強度の低下をもたらす振動による周波数変動への影響が大きくなるおそれがある。

空洞を製作する上では、表面処理を如何に完璧に行えるかが大きな問題であるが、周波数が小さい場合にはビームのダクト径が小さくなり、その部分を通してアクセスしなければならない楕円周部の表面処理が困難となる。また、実際に電場をかけた場合スパークなどを生じることによる電場の最大表面電界 E_{peak} の値は楕円周部によって決まる。ビーム軸上の実効的な加速電場 E_{acc} の値との E_{peak} との比は β が1に近い場合大凡2位で、 β が0.5近傍では3~4位の値と悪

くなるため、エネルギーの低い領域では加速効率は悪くなる。

超伝導リニアックでは、陽子ビームの速度の変化に応じて超伝導空洞の構造が持つ β の値を変化させていくが、 β の変化をあまり何種類も採ることは製作上避けたい。SNSでは200 MeVから1000 MeVまで2種類の β の値0.61と0.81を選択しており、ADS用リニアックについても100 MeVから1~1.5 GeVまで3~4種類のサイズの空洞を準備するのが妥当であろうと思われる。しかし、空洞の種類を減らすと実際の β の値と構造上の値との食い違いによって位相のずれが生じ、加速効率の低下をきたす。その結果、若干加速器長が長くなり、また、ビーム質の低下をもたらす。そのため、リニアックをRCSの入射器として利用する場合には、RCS入射の条件が極めて厳しいため、位相スリップを極力減らすため8~10種類の空洞を基本として検討を進めなければならない。

2) クライオモジュールの最適化

図11で示したのは、多連の空洞を連結した場合に、製作された空洞の構造から決まる β の値 β_g と、粒子が実際に持つ速度 β との比 β/β_g とトランシットタイムファクターの1からのズレを示した図である。ADS用のリニアックでは、これらの位相のズレをどれ位許容するかが大きな問題である。先に述べたように、シンクロトロン入射器とすることも考える際にはビームの質に厳しい条件を課せられるために、この位相のズレに対する条件が極めて厳しくなる。このズレの条件として、最大位相のズレをある一定の値例えば30度以内に制限した場合と、 $T_g - T_g^f$ (f はセル数

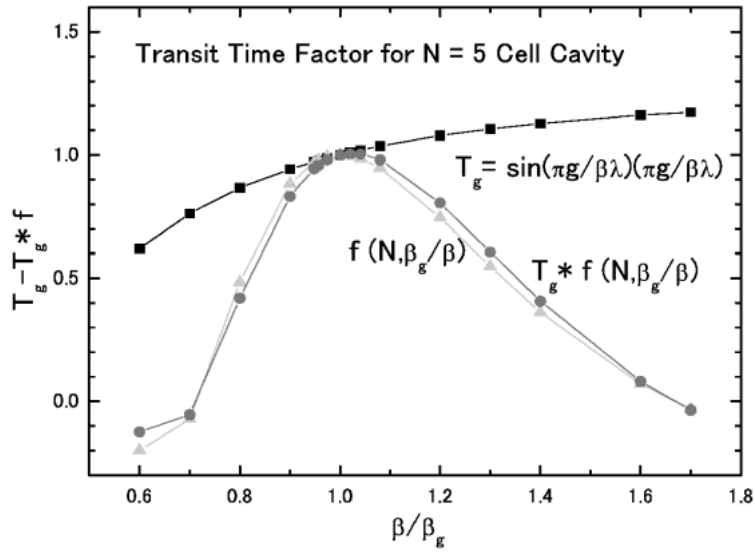


図11 位相スリップによるトランシットタイムファクタの低下の例

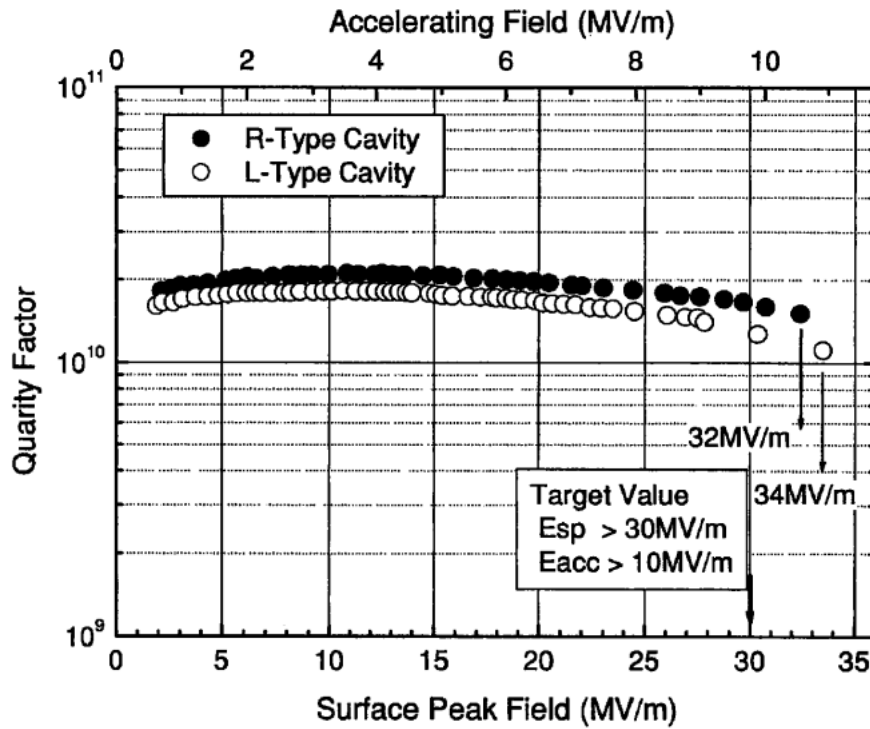


図12 超伝導リニアック空洞大電力試験結果

N と β/β_g に依存する補正係数) のズレを 0.9 以上とした場合等のケースが考えられるが、SNS の様に蓄積リングを用いる場合や ADS の様にリングへの入射を考える必要のない加速器の場合については、後者のケースのような比較的緩やかな条件をクライテリアとして用いることが出来る。

ADS 用の超伝導リニアックの機器のシステム設計

の際には、実際の組立・性能試験を通して構造等の改善の可能性等について予め詳細な情報が得ておく必要がある。また、実用機では長さを短縮するために 1 台のクライオモジュールに 3 台以上の空洞を収納する可能性も考慮する必要があるが、周波数調整のためのチューナーはクライオモジュールの胴部から駆動力を伝達するようにならなければならない。さらに、その

際には液体ヘリウムを蓄えるリザーバータンクは、高周波入力カプラとの干渉を避け、さらに容量を大きくするため、空洞の斜め上に設置するなどの工夫がある。原子力機構で検討が進められた試作機では容易に分解再組立が行なえるように、継ぎ手、フランジで結合したものが考えられた。さらに、実用機では機器の信頼性を高めるため、高調波取出カプラを含め組み立ては溶接構造を採用するなどの工夫をする必要がある²¹⁾。

3) 大電力高周波試験

図 12 に最近原子力機構で行われた、クライオモジュール内で使用される 972 MHz, $\beta=0.725$, 左 (L) 空洞と右 (R) 空洞 2 組の 9 セル空洞の単独空洞性能試験 (縦測定) 結果を示す^{21,22)}。試験温度は 2 K で、ADS 用加速器の開発目標である最大表面電界 30 MV/m の達成を確認している。実機と同じようにクライオモジュール内に空洞を組み込んだ大電力高周波試験でも、温度 4.2 K の試験において、デューティ 3% (繰り返し 10 Hz, パルス幅 3 ms) で R 空洞, L 空洞の最大表面電界が各々 41.8 MV/m, 40.0 MV/m が達成された。また、デューティ 3% における温度 2.1 K の試験では R 空洞, L 空洞各々 32 MV/m, 37 MV/m を達成した。また、その際の高周波ピーク電力

は、各々 210 kW, 260 kW であった。さらに、本試験で使用した高周波源 (クライストロン) で供給できる最大デューティ 7.5% (繰り返し 25 Hz, パルス幅 3 ms) の条件でも試験し、R 空洞, L 空洞とも最大表面電界が 30 MV/m となった。これらの試験により、何れの場合も、温度 4.2 K 及び 2.1 K において、ADS 開発の目標である最大表面電界 30 MV/m を上回る性能が得られている。これは、クライオモジュールの製作方法、表面処理・洗浄方法、組立方法が妥当であることを示している。

6. 各国の開発の現状

提案されている ADS 用大強度陽子加速器の代表例と中性子源用加速器 (SNS, J-PARC) の加速器パラメータを表 1 に示す。JAEA-ADS については、原子力機構で進められた R&D の成果等を考慮して現在設定可能なパラメータをベースに決められているものであり、今後、長さの短縮等を課題としている。X-ADS については、実用炉のものではなく、実験炉規模のものである。以下に現在提案されている諸外国の加速器開発の結果と現状について記述する。

6.1 ATW 米国

米国では、1990 年代初めから、核変換用の大強度

表 1 ADS 加速器の各国の提案

Project	Low Energy (MeV)	Intermediate Energy (MeV)	High Energy (MeV)	Total Length (m)	Frequency (MHz)	Comment
X-ADS	5	5~100	100~600		350-700	European ADS
	PFQ	SC (Spoke) / CH-DTL	SCC	290/210		
		$\beta=0.35$	$\beta=0.47, 0.65, 0.85$			
ATW	6, 11	77.8	1100	296	350-700	US-ADS
	PFQ, CCDTL	SC (Spoke)	SCC			
		$\beta=0.20, 0.30$	$\beta=0.44, 0.60, 0.75$			
SNS	2.5	(2.5~87)-(87~186)	186~1000	335	402.5-805	N-source
	RFQ	DTL-CCL	SCC			
			$\beta=0.61, 0.81$			
J-PARC	3	(3~190.8)-(190~400)	400~600	306.6	324-972	N-source
	RFQ	DTL-CCL	SCC			
		$\beta=0.72-0.79$				
JAEA-ADS	2	100	1500	572	324-972	ADS
	RFQ	DTL	SCC			
		$\beta=0.444-0.888$				

加速器の検討がロスアラモス研究所を中心に進められた。当初は、核変換の提案は熱中性子炉によるもので、その炉では 100 mA 級のより高いビーム出力の加速器が必要とされた。また、リニアックについても常伝導加速器のシステム検討を実施した。その後、核兵器用のトリチウムの生産に加速器を利用する計画 APT (Accelerator Production of Tritium) の提案では同様に電流 100 mA、加速エネルギー 1.3 GeV の検討が行われた。そして実際の加速器要素の R&D についても LEDA としてイオン源、RFQ、CCDTL などのプロトタイプ製作と試験が行われた。一方、核変換用の加速器については、その後原子力機構と同じように高速炉体型を使用する方法に変更し、ATW 計画としてとりまとめた。その加速器として、初期は 1 GeV、45 mA のものを製作し、徐々に性能を向上させ、最終的には 45 mA のものを 2 基、1.3 GeV で運転するものとした。以後、DOE ではこの APT、ATW の 2 つの計画を AAA (Advanced Accelerator Applications) 計画として統合し、その後、現在は AFCI (Advanced Fuel Cycle Initiative)、すなわち先進的核燃料サイクル計画の一環として ADS の研究開発を実施している。特に、豊富なリニアック技術開発の経験を持つロスアラモス研究所を中心に、鉛ビスマス技術の研究開発や、核変換用 MA 燃料の研究が行われている。米国では実験炉級 ADS として ADTF (Accelerator-Driven Test Facility) が検討された²³⁾。

6.2 欧州

欧州では、ADS 自体の研究については、EU を中心に加速器のみならず原子炉システムの検討や冷却材としての Pb-Bi やヘリウム冷却炉などの様々な技術開発が協力して行われている。また、基礎的な研究としても、加速器を用いた中性子核データや、核破砕反応自体の研究も進められている。加速器の開発については、フランスの CEA サクレーとイタリアの IFNF、ドイツのフランクフルト大学などで共同して基本概念の設計検討を進め、その検討結果をまとめている²⁴⁾。各加速器要素技術開発については、サクレーで IPHI 計画のもと、先に述べたイオン源 (IPHIQ)、RFQ、DTL の開発が行われている。超伝導リニアックについてはサクレーとイタリアで、低エネルギー部についてはフランクフルトで常温の CH 構造リニアックを提案している。

特に、ベルギーの SCK/CEN では、将来の ADS につながる初期の段階として、高速中性子の照射も併せて行える加速器駆動中性子源の提案と関連の開発計画 (MYRRHA) が進められている。加速器として当初

は 350 MeV、5 mA 規模のサイクロトロンを提案していたが、大電流化の問題と将来の ADS をにらんで現在は超伝導リニアックを検討している。また、この計画の特徴は、過酷なビーム窓の設計条件を回避するために、「窓なしターゲット」の概念について研究開発が行われていることである。これは、鉛ビスマスの自由液面に陽子ビームを直接入射する概念であり、鉛ビスマスや核破砕生成物の蒸気が加速器に悪影響を及ぼさないように強力な排気系を設ける措置が必要となる²⁵⁾。

6.3 その他の国

その他、韓国の原子力研究所 KAERI では陽子加速器の多目的利用を目指した PEFP (Proton Engineering Frontier Project) を進めており、既に 10 年の期間での計画は予算化されており、イオン源、RFQ などの製作が国内の多くの研究機関の協力で進められている。この計画では 2011 年頃までに 20 mA・100 MeV のリニアックを建設し、ナノテクや生命科学などに活用し、最終的には 1 GeV までエネルギーを増強して ADS の開発に使用する計画である²⁶⁾。韓国では、これまで、実験炉級 ADS 等の具体的な建設計画はないものの、HYPER (Hybrid Power Extraction Reactor) と呼ばれる実用 ADS を検討中である。

また、中国では、比較的小規模ながら、同じように加速器駆動核変換の研究が中国原子能科学研究院を中心に北京大学などで進められている。

7. 加速器の信頼性

ADS 用陽子加速器に要求される要件として特に重要なのは加速器の信頼性である。通常発電用に用いられている原子炉では、年間の稼働率は平均 80% 以上の実績を有しており、特に問題とされる計画外の緊急停止 (スクラム) の回数は国内の 50 基以上の全原子炉を通して年間数回未満である。一方、現在、主に基礎研究用に使用されている加速器では、通常、ビーム停止の頻度は格段に多い。

加速器停止の大半は高電圧機器や、高い電場が掛かっている箇所のスパークによるもの等で、基本的に電氣的な機器が主な構成要素であることから、数秒以内に再起動できるものが多く、物理学や工学の実験道具としてビームの一時的な停止が問題となることは少ない。

一方、原子力発電システムである ADS では、ビーム停止が即未臨界炉の出力と直結していることと、原子炉システムが多量の熱エネルギーを生み出すこと (通常 300°C 以上の温度を有する熱媒体を使用してい

ること)により、急激な出力の低下あるいは上昇は、システム全体の熱応力あるいは個別機器に与える負荷が極めて大きい。

7.1 ビームトリップ事象

加速器のビームトリップに伴う未臨界炉心への影響はそのトリップの時間の長さによって3つのケースに大別される。一つは1秒以内の短期のトリップ、二つ目は400 s以内の中期トリップ、三番目はそれ以上長いビーム停止である。

短期のトリップについてはビーム窓に与える影響を最も重要なものとして考慮しなければならない。ビーム窓部に着目した熱流動解析の例では、ビームトリップ後の急激な温度変化は厚い窓の方が大きな熱応力が生じることが知られており、2.2 mmの薄い窓厚を仮定した弾塑性座屈の解析で(熱に起因するひずみと変異によって発生する応力との関係として最も小さな値を用いたとしても)、窓部で座屈が起こりうる圧力は、想定された最大圧力の3倍を上回っており、安全側である。さらに、ビームトリップが頻発した際の繰り返し疲労についても、許容繰り返し回数は 10^5 以上という解析結果が得られており、ビーム停止の想定回数2000回を上まわっている。

また、原子炉炉心へのビームパワーの供給停止に伴う冷却のバランスの崩れにより、炉心内面あるいは原子炉容器内面が急速に冷却され内外面の温度差による炉心容器あるいは炉容器の熱応力が発生する。これらの繰り返し応力を課するプラント停止の許容回数についても、加速器以外の要因によるプラントの停止も含めてそれぞれ 1×10^4 と評価された。この許容回数は、例えば月1回の割合で該当の事象が発生するとした場合、原子炉寿命40年間分の500回を上回っている。一方、400秒までの中期のトリップによるビー

ム停止に伴う一次冷却材鉛ビスマスの温度低下についても、この時間間隔では凍結が起きる 200°C を下回ることではなく、400秒以内に直ちにビームが復帰できれば、大凡30分程度でビームトリップ前のプラントの状態に復帰することが出来るとの結果が得られており、継続的なプラントの運転が可能となるとされた。

更に、加速器の真空系、冷却系、ビーム収束系、電源系など、一般的にそれ以上の長い時間加速器が停止する故障が発生した場合は、発電の停止も含めた強制的なプラント本体の停止に至る。このようなビームトリップによるプラントへの影響は、これまでの原子炉では想定する必要のなかったADS特有の技術課題である。炉心への熱衝撃や発電用タービンの停止などを考えると、ビームトリップ後に早く復帰させることが重要であるが、さらに、出力低下による炉心温度の変化に起因する実効増倍係数の変化などの様々な影響も想定されている。加速器側のトリップ低減に関する様々な技術的な課題については、OECD/NEAが主催する専門家会議やLINAC Conference等で加速器本体、制御、ターゲット等の観点からの議論が行われており、現状の把握と開発課題の抽出が精力的に行われている^{27,28)}。

7.2 加速器のビームの停止とその信頼性

ADS用加速器のビームを停止する必要は、加速器側のみのトラブルと併せて、未臨界炉心側からの停止要求も併せて考える必要がある。例えば、冷却材の循環に何らかの原因があり、冷却能力が低下した場合、そのままビームを供給し続けた場合には、炉心側に重大な損傷を与えることになる。そのため、未臨界炉側から停止要求があった場合についても、速やかにビーム供給を停止しなければならない。

一般的に、加速器側のトラブルで、ビームを停止す

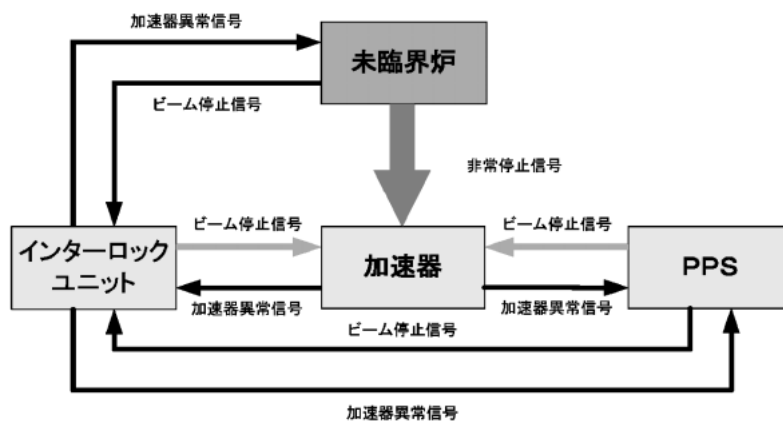


図13 加速器停止信号の流れの概念図

る必要があった場合については、様々な考察が行われており、加速器機器の損傷を防止するためにJ-PARC 規模の加速器の停止に必要な時間は数十マイクロ秒で、その間にビームを停止することが必要とされている²⁹⁾。ADS 用加速器についても同様で、ビーム停止のための機構として、図 13 の矢印で示したイオン源プラズマ源の停止、イオン源電流引出し電圧断、ビームストップの挿入、RFQ 用 RF 停止等の採用が検討されている。停止の信頼性については、主要因である停止用リレー等の故障率は 1×10^{-7} (1/回) 程度と言われているが、その信頼性を更に向上させるためには、停止についても多数の方式を同時に使用することで信頼性を上げる必要がある。

また、ADS プラントでは、ビームトリップが頻発すると未臨界炉心並びにターゲット部に過大な熱衝撃を与えるため、ADS 用加速器は、高度のビーム安定性、ビームトリップに関する信頼性が要求される。加速器サブシステムの信頼性については、既存の加速器として、ロスアラモス研究所の LANSCE の 1997 年度 1 年間の運転の実験を詳細に評価した論文がある³⁰⁾。その論文では、故障の発生が比較的頻発するイオン源、RF 源、真空系などについてその故障回数を調査し、機器ごとの平均故障間隔 MTBF (Mean Time Between Failure) を得ている。これらのデータベースを、ADS 用の加速器システムに当てはめ、機器の個数を考慮すると、現在の全加速器システムの MTBF は大凡 6 時間となった。この値は平均 6 時間に 1 回 ADS システムが停止することを表しており、とても許容できるものではない。

一方、加速器の年間の稼働率 (ユーザーにビームを

供給しているトータルの時間) については、多くのユーザーを有する放射光施設や中性子源施設用加速器などの最近の実績からみると、スケジュールタイムの 99% 近くを達しているものもある。加速器の保守管理に要する時間を考慮しても平均の稼働率を 80% 程度にすることは達成可能であると思われる。

7.3 信頼性の向上の方策

これまでに開催された、OECD/NEA の加速器の信頼性向上の方策に関する会議での議論によれば、最大の課題であるビームトリップ防止、あるいは低減させる対策として、各サブシステムの信頼性を向上させることとあわせて、以下の 4 つの対応策を提言している。それらは、①余裕のある設計 (Part Derating)、②冗長なシステム (Redundancy/Spares)、③自己修復システム (Fault Tolerance)、④保守・管理の徹底 (Maintenance) である。

これらの対応策は、システムの停止に伴う長時間の故障については、故障箇所を直ちに健全なものに切り替えるなどのバックアップシステムを有した②冗長なシステムと④徹底的な保守・管理の体制が有効とされる。一方、イオン源や高電圧機器のスパークなどに起因する短時間の故障については、ぎりぎりの 100% の性能で使用せず、常に①余裕のある設計で対応すること、有効な制御系などを用いた③自己修復能力を有することが有効である。故障したときにバックアップできる冗長なシステムを構築することが考えられるが、これらの対応策を予め行うことは、コストの上昇をもたらすことが予想されるため、未臨界システムなどを含む全体のバランスの良いシステムを構築することを考慮することが必要となる。

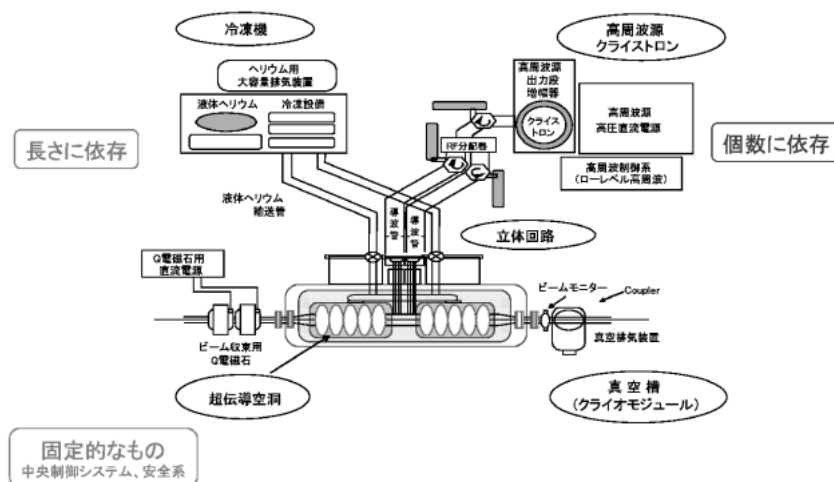


図 14 超伝導リニアックのコストファクター

表2 簡易計算方式による加速器規模の目安

Cavity β	0.48	0.78	0.88
Energy In (MeV)	100	214	575
Energy Out (MeV)	214	575	1485
Number of Cryomodule	16	27	33
Eacc (MV/m)	7.07	9.82	14.3
ϕ	-25	-25	-25
Active Cavity Length (m)	0.601	0.8145	1.101
Cavities per Cryomodule	2	2	2
Cryomodule Length (m)	4.202	4.629	5.202
RF Power (kW) 20 mA	77	146	288
	30 MW	10 MW	
No. of klystrons	51	51	
Total RF power (MW)	87	24	
Total cryo power (KW)	34		
Heat leak (W/m)	4		

表3 加速器コストの目安

コスト (30 MW)	相対コスト	個数	単位	全体
(1) 長さ依存				
加速構造体	0.4	363.9	m	145.56
冷凍機	0.2	363.9	m	72.78
補助装置 (ビームモニター等)	0.05	363.9	m	18.20
(2) 空洞の数に依存				
加速空洞	0.2	152	個	30.4
収束用 Q 磁石	0.05	152	個	7.6
真空系	0.05	76	個	3.8
高周波アンプ (クライストロン)	0.4	51	個	20.4
立体回路	0.06	51	個	3.06
直流高圧電源	1	51	個	51
低レベル・補助電源・ 立体回路	0.2	51	個	10.2
(3) その他(固定的なもの)				
中央制御・発振系・ 安全系	50	1		50
				413

8. 加速器のコストファクター

8.1 加速器のコスト要因

ADS用の加速器のうち、最も大きな部分を占める超伝導リニアックについての主な構成要素とそのコストファクターを図14に示す。まず、超伝導空洞、RF電源、ビーム収束系、真空ポンプなどその個数に依存するもの、冷凍機、クライオモジュール機器など長さによるもの、中央制御システムなどの一定の固定的なものに分けることが出来る。

表2にADS用加速器のために、新たに大凡の構成を考えて加速器の規模(加速器構成要素の個数、加速器長さなど)を見積もった結果を示す。この評価ではスプレッドシート方式を用いた簡易型の計算方式を採用し、加速エネルギー1.5 GeV、加速電流20 mAとし、加速周波数は従来からの原子力機構の構成600 MHzを採用した。また、加速空洞の表面最大電場を30 MV/mとし、位相スリップに伴うトランシットタイムファクターの変化を0.95%まで許容している。これらは、かなり荒い評価ではあるが、一応のコスト評価の目安を与えるものと考えている。その結果によると全体の長さは385 mとなった。クライストロンの数や必要電力、全体の冷凍機の能力なども併せて評価している。

表3にこれらの値を基礎とした、コストの割合を示す。ADS用に与えられたコストについては、過去に長さあたりの単価、RFパワーあたりの単価等から簡便に求めた例や、APT用のコスト評価があるが、個々のケースや、国によって様々なものであり、統一したコスト評価の手法が確立してはいない。ここで示した割合についても極めて荒いもので、今後、SNSの実績、R&Dによる積み上げなどをベースに更にその精度を上げる必要がある。(しかし、一般的に研究用の加速器施設の場合、その他様々な要件があり、建設コストの積み上げの精度を上げることは困難な場合が多いが、)今後、実用的なADS用加速器の開発を進めていくには原子炉技術者と加速器技術者との連携を深めてこれらの精度を向上させる必要がある。

8.2 運転電力の評価

ADS用の加速器のうち、最も運転についての電力を必要とする超伝導リニアックについて、JAEA-ADS検討の際に行った大凡の要求量を示す。運転の電力については、空洞駆動用のRF源、ヘリウム冷凍機、電磁石電源、100 MeV加速器及びユーティリティについて運転電力を評価する。これらの評価では、ビームの安定性の向上のために超伝導空洞用RF源として超伝導空洞2台(クライオモジュール1台)をクライストロン1台で駆動し、最大出力時の高電圧

を常に印加する場合と、必要電力に応じて印加する場合について所要電力を求める。その結果、クライストロンを3種類用意する場合、前者の条件で81.6 MW、後者の条件では69.6 MWの電力が必要となった。また、電力効率は各々34.3%、40.2%である。低温ヘリウム冷凍機については、主圧縮機モータ電力と減圧圧縮機モータ電力を合わせて16.4 MWが必要となった。電磁石電源については、178台の四極電磁石と52台のステアリング電磁石を合わせて0.4 MW程度の消費電力と算出された。100 MeV 加速器では10.0 MW、ユーティリティでは9.7 MWがそれぞれ必要となると見積もった。

これらを合計すると、加速器の運転に必要な電力は、大凡100 MWとなり、ビーム出力30 MWに対して電力効率は約30%となる。

9. ま と め

ADSはMAの燃焼のみでなく、多様な燃料組成に対して許容性が高いため、様々なシステムでの利用もまた提案されている。我が国ではプルトニウムは燃料として通常の軽水炉や高速炉での利用を基本としているが、プルトニウムを核変換の対象としてADSの燃料とする概念や、トリウムをADSの燃料として²³³Uを生産し、新たなエネルギー源とするエネルギー増幅器(EA: Energy Amplifier)の提案もなされている。このように、ADSは、多くの国で魅力的な概念として捉えられて盛んに研究開発が行われている。特に欧州での研究では、先に述べた、実験炉級ADS(XADS)の建設計画のもと、原子炉物理、材料の基礎研究等広範囲にわたった基礎研究など多くのプロジェクトを相補的に進めている。

我が国では、J-PARC計画の第2期計画として、実験炉級ADSと現在の要素技術開発の中間に位置する計画である「核変換実験施設 TEF: Transmutation Experimental Facility」を建設することを計画している⁵⁾。核変換実験施設は、低出力(10 W程度)ながら600 MeVの陽子ビームを用いて未臨界体系の炉物理特性を測定する「核変換物理実験施設」と、200 kWの高出力陽子ビームで鉛ビスマス核破砕ターゲットの技術開発を行う「ADSターゲット試験施設」からなる複合施設である。核変換物理実験施設では、未臨界体系での出力分布測定、高エネルギー粒子の影響評価、未臨界度の測定、MAやFPの核変換特性の測定等、炉物理的な実験を行うと共に、陽子ビーム出力を調整することで炉出力を制御する手法やビームトリップ時の運転制御法等の開発を行う。ADSターゲッ

ト試験施設では、温度条件や照射条件等を変化させ、鉛ビスマス核破砕ターゲットとビーム窓に関する材料・熱流動・システム特性等のデータを蓄積する。

ADSに基づいた核変換の研究は、今後原子力が持続可能なエネルギー源として継続して利用されていくための、廃棄物処理の負担を軽減する重要な研究の一つである。加速器はその中でも重要な位置を占めるものである。この計画に用いる加速器は、従来の基礎研究用のものとは大きく異なり、まさに、本来の意味の実用化に向けての研究開発が重要である。特に、その信頼性、安全性、さらには経済性などのこれまでの加速器とは異なる厳しい要求が突きつけられている。

謝辞

本報告の一部は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として日本原子力研究開発機構が実施した平成15及び16年度「加速器駆動核変換システムの技術開発等」の成果の一部を含みます。

参考文献

- 1) T. Mukaiyama, et al., "Review of Research and Development of Accelerator-Driven System in Japan for Transmutation of Long-Lived Nuclides," *Progress in Nuclear Energy*, 38, 107 (2001).
- 2) 総説 分離変換工学, 「加速器を用いた長寿命核種の核変換処理」, 分離核変換工学研究専門委員会, 日本原子力学会, 2004年2月
- 3) K. Tsujimoto, et al., "Neutronics Design for Lead-bismuth Cooled Accelerator-driven System for Transmutation of Minor Actinide", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 41, 21 (2004)
- 4) K. Nishihara, et al., "Transmutation of Minor Actinide, Iodine-129, Technetium-99 Using Accelerator-Driven System" *Proc. of GLOBAL2001*, Paris, France 2001
- 5) H. Oigawa, et al., "R&D Activities on Accelerator-driven Transmutation System in Japan", *Proc. of Eighth Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Products Partitioning & Transmutation*, Las Vegas, USA, 9-11 November 2004
- 6) 渡辺 昇, 「核破砕中性子源工学概論」, *JAERI-Review 2000-031* (2001)
- 7) S. Saito, et al., "Design Optimization of ADS plant proposed by JAERI", *Proc. of AccApp 2005*, Nucl. Instrum. Methods, to be published.
- 8) "Summary of Technical Session I, Accelerator Reliability", *Workshop Proceedings of Utilization and Reliability of High Power Proton Accelerators*, Daejeon, Republic of Korea, 16-19 May 2004, p559
- 9) 森 義治, 町田慎二, "連載講座加速器・ビーム科学第5回加速器の汎用性をめざして—FFAG加速器の

- 開発と応用”, 日本原子力学会誌 44, 8, 606 (2002).
- 10) J. D. Sherman, et al. “Status Report on a DC 130-mA, 75 keV Proton Injector”, Rev. Sci. Instrum. 69 (1998) 1003
 - 11) R. Gobin, “Reliability of the High Power Proton Source SILHI”, Proc. 2nd International Workshop on Utilization and Reliability of High Power Proton Accelerators, 22–29 November 1999, Aix-en-Provence, France
 - 12) H. V. Smith Jr and J. D. Schneider, “Status Report on the Low-Energy Demonstration Accelerator (LEDA)”, Proc. LINAC2000, 21–25 August 2000, Monterey, USA, p581
 - 13) K. Hasegawa, et al., “Development of a High Intensity RFQ at JAERI”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol 34, No. 7 (1997) p622
 - 14) P-Y. Beauvais, “Recent Evolutions in the Design of the French High Intensity Proton Injector”, Proc. of EPAC-2004, Lucerne, Switzerland, p1273
 - 15) A. Pisent, et al., “TRASCO RFQ”, Proc. of LINAC2000, Monterey, U.S.A, 2000, p902
 - 16) N. Holtkamp, “Status of the SNS Linac: An Overview”, Proc. of LINAC2004, Lübeck, Germany, 2004, p837
 - 17) Y. Yamazaki, “Status of the J-PARC Linac, Initial Results and Upgrade Plan”, Proc. of LINAC2004, Lübeck, Germany, 2004, p554
 - 18) T. Tajima, et al., “Results of Two LANL $\beta=0.175$, 350-MHz, 2-Gap Spoke Cavities”, Proc. of PAC 2003, Portland, USA, 2003, p1341
 - 19) G. Olry, et al., “Recent Developments on Superconducting $\beta 035$ and $\beta 015$ Spoke Cavities at IPN for Low and Medium Energy Sections of Proton Linear Accelerators”, Proc. of EPAC2004, Lucerne, Switzerland, 2004, p1003
 - 20) H. Podlech, et al., “First Tests of the Superconducting CH-Structure”, Proc. of PAC2005, Knoxville, USA, 2005, p3414
 - 21) N. Ouchi, et al., “Development of a Superconducting Proton Linac for ADS”, Workshop Proceedings of Utilization and Reliability of High Power Proton Accelerators”, Daejeon, Republic of Korea, 16–19 May 2004, p175
 - 22) E. Kako, et al., “High Power Test of the Prototype Cryomodule for ADS Superconducting Linac”, Proc. of PAC2005, Knoxville, USA, 2005, p3579
 - 23) United States Department of Energy: “Report to Congress the Advanced Accelerator Applications Program Plan,” March 30, 2001 (2001).
 - 24) The European Technical Working Group on ADS, “A European Roadmap for Developing Accelerator Driven System (ADS) for Nuclear Waste Incineration,” April 2001 (2001).
 - 25) H. Ait Abderrahim, et al., “MYRRHA: Multi-Purpose Accelerator Driven System for Research and Development”, Nucl. Instrum. Methods, A463 (2001) 487
 - 26) B. H. Choi, “Status of the Proton Engineering Frontier Project”, Proc. PAC2005, Knoxville, U.S.A, 2005, p576
 - 27) Janglai Cho, “Technological Aspects and Challenges for High-Power Proton accelerator-driven System Application”, Workshop Proceedings of Utilization and Reliability of High Power Proton Accelerators”, Daejeon, Republic of Korea, 16–19 May 2004, p153
 - 28) L. Hardy, “Accelerator Reliability-Availability”, Proc. EPAC2002, Paris, p149
 - 29) H. Takei and H. Kobayashi, “Derivation of Simple Evaluation Method for Thermal Shock Damage on Accelerator Materials Caused by Out-of Control Beam Pulses and its Application to J-PARC”, J. Nucl. Sci. Technol. 42, 1032 (2005)
 - 30) M. Eriksson, “Reliability of the LANSCE accelerator system,” Workshop Proceedings of Utilization and Reliability of High Power Proton Accelerators”, Mito, Japan, 13–15 October 1998, p183