小特集

J-PARC における加速器駆動 核変換システム (ADS) の研究開発

R&D on Accelerator Driven Nuclear Transmutation System (ADS) at J-PARC

1. 加速器駆動核変換システム(ADS)

1. Accelerator Driven Nuclear Transmutation System (ADS)

前川藤夫 MAEKAWA Fujio 日本原子力研究開発機構 (原稿受付:2022年1月20日)

核変換技術は、原子力発電に伴い発生する「核のゴミ」問題の有力な解決手段である.大強度加速器と未臨 界炉心を組み合わせた加速器駆動システム(ADS)は、核変換を行うための有望なツールである.本章では、 ADSによる核変換の意義と原理、ADSの設計例、核変換を含む分離変換技術とその効果、必要とされる大強度加 速器の性能、海外の動向等について解説する.

Keywords:

accelerator driven system, nuclear transmutation, partitioning and transmutation technology, minor actinoid, fission product

1.1 核変換とは

1.1.1 核のゴミ

原子力発電に伴い発生する使用済み燃料を再処理し,ウ ランとプルトニウムを再利用する資源として取り出した残 りが,高レベル放射性廃棄物,いわゆる核のゴミである. これには大きく分けて,核分裂生成物(Fission Product, FP)とマイナーアクチノイド(Minor Actinoid, MA)が含 まれている.FPは原子番号92のウラン(U)等が核分裂で 2つに割れることによりできるため,原子番号が数十~70 程度の元素からなる.一方 MA は,主にウランが中性子を 吸収して生成した超ウラン元素のうちプルトニウム (Pu)を除く元素であり,ネプツニウム(Np,原子番号 93),アメリシウム(Am,同95),キュリウム(Cm,同96) が主なものである.これら FPや MA には,安定な核種や 短時間で崩壊して安定な核種になるものも多いが,崩壊の 半減期が万年単位のものなど長期にわたり毒性が残る核種 も存在する.

典型的な原子炉の新燃料 (²³⁵U 4.5%, ²³⁸U 95.5%) 1 トン を燃焼して生成する使用済み燃料中の,主な長寿命放射性 核種を図1に示す.1トン中,約940 kgはUのままであり, Pu が約10 kg (重量比1%) 生成する.これら2元素は再 処理の過程で取り出され,燃料として再利用される.この 残りが高レベル放射性廃棄物である.代表的な長寿命の MAとして,²³⁷Np,²⁴¹Am,²⁴³Am,²⁴⁴Cm があげられる. MA の総量は約1 kg (重量比0.1%) であり,Pu の約1/10 である.FP の総量は約50 kg であり,このうち長寿命なFP は特にLLFP (Long Lived Fission Products) と呼ばれる. LLFP の主なものは図1に示すとおりであり,その総量は 約5 kg (重量比0.5%) である.

図1には、これらの放射性核種を人体に摂取した場合の 単位放射能あたりの線量を示している. PuやMAの多くは α 崩壊し、 α 線は体内被ばくに対する影響が β 線や γ 線より大 きいことから、単位放射能あたりの線量が100~250 μ Sv/kBq と大きく、LLFPよりも毒性が高いことがわかる.

1.1.2 核のゴミ問題解決の切り札,核変換

現在の日本のシナリオは,高レベル放射性廃棄物をガラ ス固化体としてガラスの中に封じ込め,さらにその外側に 幾重かのバリアを設け,深さ300mより深い地下に埋める

Nuclear Transmutation Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

author's e-mail: maekawa.fujio@jaea.go.jp



図1 使用済み燃料中の主な放射性核種.

地層処分を行う考えである.地層処分により安全に高レベ ル放射性廃棄物を処分可能とされているが,国内では地層 処分場の選定がなかなか進まず,原子力発電はトイレ無き マンションと揶揄される原因になっている.また,安全に 地層処分できるとしても,我々世代は原子力エネルギーの メリットを享受してきた一方,廃棄物というデメリットを 後の世代に押しつけており,世代間の公平の点で問題が残 る.核変換は,こうした状況を大きく改善できる可能性を 秘めた技術である.2021年11月に閣議決定された「エネル ギー基本計画」[1]では,使用済燃料対策として,将来の幅 広い選択肢を確保するため,核変換による放射性廃棄物の 減容化・有害度低減などの技術開発を進めるとされてい る.現時点において核変換は将来必ず導入するという技術 ではなく,将来の選択肢の1つとの位置付けである.

1.1.3 カーボンニュートラルへの貢献

2020年10月,政府は2050年までにカーボンニュートラル をめざすことを宣言した.これを実現するためには,化石 燃料の使用による二酸化炭素の排出を大きく抑制する必要 があるが,2019年現在発電電力量の約75%を担っている化 石燃料による電力[2]を全て再生可能エネルギーで代替す ることは困難であり,原子力エネルギーの利用はカーボン ニュートラルの実現に向けた重要な手段と考えられる.現 在は,放射性廃棄物の問題が未解決であることも一因と なって,国内における原子力エネルギーの利用が進まな い.そこで,核変換の技術開発を進めることにより,核の ゴミ問題には解があることを示して原子力エネルギーの利 用を促進することにより,カーボンニュートラル実現の一 助となることが期待できる.

1.2 加速器駆動システム(ADS)

1.2.1 ADSとは

核変換を行うには、大きく分けて加速器を使う方法と原 子炉を使う方法があるが、本章では前者について述べる. 図2,3に加速器により核変換を行う加速器駆動システム (Accelerator Driven System, ADS)の原理と設計例[3] を示す.ADSとは、加速器と未臨界炉心を組み合わせたシ ステムのことである.ここで未臨界炉心とは、持続的に出 力が一定に保たれる通常の原子炉の臨界炉心とは異なり、 外部から中性子を供給することにより核分裂反応が継続し て出力を一定に保つことができるが、外部からの中性子供 給を絶つと急速に核分裂の連鎖反応が停止する炉心のこと である. ADS では,加速器で加速した陽子等のビームを標 的に当てることにより中性子を発生させ,これが未臨界炉 心に対する外部からの中性子供給にあたる.

ADS の応用には核変換,照射,RI 製造などが考えられ る.核変換はあくまでも ADS の応用の1つであり,全ての ADSで核変換をするわけではない.まとまった量の核のゴ ミを核変換するためには,ADSでも特に大出力のものが必 要になる.

1.2.2 核変換のための ADS 設計例

図2,3に示した設計のADSでは,超伝導陽子加速器に よりエネルギー1.5 GeV,電流値20mA,出力30 MWの高 エネルギーかつ大強度の陽子ビームを加速し,これを未臨 界炉心中心にある鉛ビスマス合金のターゲットに打ち込 む.陽子は鉛やビスマスの原子核と反応し,多くの中性子 を生成させる.ターゲットの周りにMAを含む核燃料を配 置しておくと,生成した中性子がMA(Np,Am,Cm)の 原子核と核分裂反応を起こす.1回の核分裂反応により複 数の中性子が発生し,この中性子がさらに周りのMAと核 分裂反応を起こし,いわゆる連鎖反応により次々とMA を核分裂させる.核分裂の結果FPが生成し,その中には長 寿命のものもあるが,FPの多くは安定または短寿命の原 子核であるので,全体として放射性廃棄物は減少すること になる.この未臨界炉心は直径と高さが共に約10mのタン クに収められており,タンク内は液体の鉛ビスマス合金



図2 加速器駆動システム (ADS) の原理.



図 3 ADS 概念図と諸元.

(融点125℃)のプールになっていて、この液体鉛ビスマス を冷却材としてポンプで循環して炉心を冷却する.炉心で は多くの核分裂反応が起こることにより800 MWの熱エネ ルギーが発生する.この熱により蒸気発生器で蒸気を発生 させ、タービンを回して発電を行うことにより270 MW の電力が得られ、そのうち100 MW は自身の加速器に供給 し、残りの170 MW は売電する.つまり、ゴミを燃やしな がら発電もできるシステムと言うことができる.炉心には 2.5 t の MA を装荷することができ,1年間の運転でこの 10%に相当する250 kg の MA を核分裂させることができ る.これは、通常の原子炉10基で1年間に生成する MA の量に相当する.ADS の主な特徴として、未臨界炉心なの で加速器を止めれば核分裂の連鎖反応も停止するため原子 炉としての安全性が高いことと、また ADS 1 基で原子炉 10基分と効率的に MA を核変換可能なことがあげられる.

1.2.3 3つの素朴な疑問

さて、図2,3に ADS の設計例を示したが,いくつか素 朴な疑問が生じる.1つめの疑問として,わざわざ原子炉 を持ち込まなくても,高レベル放射性廃棄物に直接陽子 ビームを当てればいいのではないか?しかしこのアイデ アでは核変換の効率が極めて悪い.加速器に供給する電力 を原子力発電に頼るとすれば,放射性廃棄物は減るどころ か大幅に増えてしまう.また,大強度陽子ビームを当てた 高レベル放射性廃棄物を適切に冷却することが難しく,工 学的に成立しない.

2つめの疑問として、なぜ MA だけ核変換するのか? これは、FP は主に β 線や γ 線を出すのに対し MA はa線を出し、 α 線は β 線や γ 線と比べ内部被ばくの影響が大 きいことから、図1 に示したように経口接種した場合に MA の方が人体に対する毒性が高いことが理由の1つであ る.また、MA は核分裂の連鎖反応を利用できるので効率 よく核変換できるが、FP は連鎖反応を起こさないために 加速器では効率的かつ経済的に核変換することがMAより もはるかに難しいことによる.そこでまず、MA を優先し て核変換することを考えている.

3つめの疑問として、なぜ聞き慣れない鉛ビスマス合金 という金属をターゲット材および冷却材として使うのか? その理由は、以下のとおりである. MAの核変換にはエネ ルギーの高い中性子が適しているが、冷却材に水を使うと 中性子が水に含まれる水素と衝突したときに大きくエネル ギーを落としてしまうため、うまくいかない. そこで、液 体金属を使うことを考える.液体金属というとまず水銀を 思い浮かべるが、水銀は沸点が357℃と低く、炉心で発生す る800 MWもの熱を除去する冷却材としては適さない。次 に高速炉で冷却材として使う液体ナトリウムはどうか. ナ トリウムは冷却材として優れた性質を有する.しかし,軽 い原子核は高エネルギー陽子と反応したときに生成する中 性子が少なく、ターゲット材としては適していない. 一方、 鉛ビスマス合金(正確には, 鉛ビスマス共晶合金と呼ばれ る 鉛 44.5 wt%, ビスマス 55.5 wt%の 合 金) は 融 点 が 1,670℃と高く優れた冷却材であると同時に、重い原子核 であり陽子入射時に多数の中性子を生成するため, ター

ゲット材としても優れた性能を有する.また,ナトリウム とは異なり化学的に不活性な点も有利である.ただし,密 度が10.5 g/cm³と高く重い金属であるため耐震設計が難し くなること,また高温の鉛ビスマス合金は鋼材に対する腐 食性を有するために腐食抑制対策が必要になることが主な 課題である.

1.3 分離変換技術

前述したとおり高レベル放射性廃棄物そのままでは効率 良く核変換できないため、まず、高レベル放射性廃棄物に 含まれる元素をその特性に応じていくつかの群に分離す る.その後、核変換に適した元素を対象に核変換を行う. この一連の技術を「分離変換技術」と呼んでいる.図4に 分離変換技術の概要を示す.分離変換技術は、家庭で発生 するゴミを燃えるゴミ、燃えないゴミ、資源ゴミのように 分類し、その特性に応じて有効利用や処分したりすること に似ている.

1.3.1 群分離

高レベル放射性廃棄物は、ウランとプルトニウムを取り 出した後の多種多様な元素が含まれた混合物である.分離 変換の第1段階「群分離」の工程では、廃棄物中の元素を 大きく4つの群(MA群,白金族群,発熱性元素群,その 他の元素群)に分類する.放射性毒性が高く半減期が長い ものが多いMAは、1つの群として分離する.残る3群は FPである.白金族群にはガラス固化に悪影響を与える元 素が含まれるとともに、価値の高い金属の有効利用も考え られることから、1つの群として分離する.半減期が約30 年のストロンチウム90(⁹⁰Sr)とセシウム137(¹³⁷Cs)は発 熱量が非常に高いため、発熱性元素群として分離し、安定 化・固化して別途管理することにより他の群の発熱量を減 らし、また熱源や放射線源として利用する.残りがその他 の元素群であり、ガラス固化体として地層処分する.

1.3.2 核変換専用の燃料製造と再処理

群分離により MA を分離後, そのままでは未臨界炉心を 組むことはできない. そこで, MA を窒化物にして焼き固 め, ペレット状に加工する. これを集めて燃料ピンに封入 し, さらに燃料ピンを束ねて燃料集合体とし, 炉心に設置 する. この炉心に陽子ビームを導入すれば, ADS として動 作して MA が核分裂反応を起こし, その量が減っていくこ とになる. しかし, ADS の運転を行えば全ての MA が核分 裂して無くなるかというとそうではなく, MA の減少に伴 い核分裂の数が減って出力を維持できなくなることか ら, 2 年間運転した時点で MA 燃料を取り出す. 取り出し



図4 分離変換技術の概要.

たMA 燃料の中には,まだ当初の約80%のMA が残っている.そこで,取り出したMA 燃料を溶かしてMAを回収し, 再度 MA 燃料に加工して ADS で核変換を行う.つまり,核 変換専用の再処理をして,燃料サイクルを回すことになる.

1.3.3 分離変換技術の研究開発課題

ADS そして分離変換技術は、まだ基礎的な研究開発を 行っている段階である.原子力機構では、国内の大学等や 海外の研究機関との協力を活用しつつ、研究開発を進めて いる.1.3.1,1.3.2節で述べた群分離や核変換専用の燃料 製造および再処理技術については、現在グラムオーダーの MA を使用した実験室規模の試験を行っており、それぞれ の技術の原理的成立性を確認している.

ADS は加速器と未臨界炉心を組み合わせたシステムで あるが、陽子ビームが輸送される加速器側の真空領域と未 臨界炉心側の鉛ビスマスターゲット領域は陽子ビーム窓と 呼ばれる金属板により隔てられる.この陽子ビーム窓は, 陽子ビームや中性子による照射や鉛ビスマスによる腐食を 受けるため、陽子ビーム窓として使用可能な材料の開発が ADSの成立性を左右する重要な課題である. そこで茨城県 東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC Japan Proton Accelerator Research Complex [4] では,流動鉛ビスマス環境 下で実際にビーム窓材料を陽子ビームで照射し、その影響 を調べるための実験施設[5]を計画しており、本小特集第 2章で紹介されている.また,第3章では鉛ビスマス技術 の研究開発の現状について紹介されている. ADSの特徴と して,現在の世界最高出力の陽子ビームよりもさらに大強 度の陽子ビームを取り扱うこと, またその陽子ビームを作 り出すための大強度加速器の開発が必要であり、これらに ついてはそれぞれ本小特集第4章,第5章で紹介されてい る.

なお,分離変換技術や本節で簡単に触れた研究開発の現 状については参考文献[6]に詳述されているので,詳細は そちらを参照されたい.

1.4 分離変換技術の効果

高レベル放射性廃棄物を分離変換することの効果,つま り廃棄物の有害度や地層処分場に対する負荷をどの程度減 らすことができるのかを図5に示す.図5の左側は、地層 処分に必要な面積である.使用済燃料をウランやプルトニ ウムを回収しないまま直接埋めた場合(直接処分に相当) に必要な面積を190(相対値)とした場合,現行方針に基づ き核燃料の再処理によりウランとプルトニウムを回収し、 高レベル放射性廃棄物として埋めるのに必要な面積は100 となる.ADS分離変換を導入してMAを核変換すると、必 要面積が30にまで減る.さらに地上において数百年間長期 貯蔵すると、半減期約30年の⁹⁰Srと¹³⁷Csの放射能が大きく 減衰し、発熱の減少によりガラス固化体を密に埋めること ができるため、必要な面積は1にまで低減する.

一方,図5右側は分離変換の効果を時間スケールでみた ものである.放射性毒性の総量が元々の原料ウランの毒性 を下回るのに必要な時間でみた場合,使用済核燃料を直接



図5 分離変換技術の効果.

埋める場合には10万年を要する.再処理して高レベル放射 性廃棄物として埋める場合には5,000年にまで低減する. さらに ADS 分離変換を導入すれば,300年にまで短くな る.300年といっても,我々人間の時間スケールから考える と非常に長い時間であることに変わりはない.しかしなが ら,白川郷の民家のように300年前の構造物であっても適 切に管理すれば十分に使用可能であるし,万年オーダーと 比べると格段に短く,世代間の不公平の軽減にも貢献して いると言える.

このように、将来、分離変換技術が実用化されれば、地 層処分に必要な面積を小さく、また高レベル放射性廃棄物 の放射性毒性が低減する時間を大幅に短くでき、さらに白 金族のような一部の放射性廃棄物を資源化できる可能性が あるなど、大きな効果が期待できる.

1.5 加速器の実力

ここで,現実的な量の MA 核変換という達成目標に対し,現在の大強度加速器がどれほどの実力を有するのかを 試算してみる.

世界的に最高レベルの出力を有する J-PARC[4]の場 合,最大出力は1 MW であり,3 GeV シンクロトロンで加 速されるエネルギー3 GeV の陽子ビームに含まれる陽子数 は2.08×10¹⁵ protons/sである.仮に1年間休み無く連続で 運転した場合,3,600秒,24時間,365日を乗じて,陽子数 は 6.57×10^{22} protons/y となる. 10^{22} 個というととても多い ように感じるが,1 mol は 6.02×10^{23} 個であるから,1年間 連続運転したとしても陽子数は約 0.1 mol にしかならない. 全ての陽子に電子を与えて水素原子とし,さらに酸化して H₂O にすると,たったの 0.05 mol, 1 g, 1 cm³ の水にしかな らない.

一方で, 我々が対処しなければならない MA は, 原子炉 1 基あたり年間約 25 kg, 100 mol 発生する. 仮に国内で原 子炉が40基稼働すると仮定すると, 年間 1トン(25 kg×40), 4,000 mol の MA が発生する. 陽子数 0.1 mol と MA 原子数 4,000 mol では, 4 万倍もの開きがある. このように, 現在 の大強度加速器といえども, 核変換が対象とする圧倒的な 物量の前では実力不足のようにも見える. では、ADSによる現実的な量のMA核変換は非現実的か というと、そうではない.高エネルギー陽子を標的に入射 すると、核破砕反応により多数の中性子が発生する.重金 属標的にGeVオーダーの陽子を入射する場合、エネルギー 40~50 MeVで1個の中性子が発生するため、3 GeVの陽子 1個あたり約70個の中性子が発生する.また未臨界炉心の 核分裂連鎖反応を利用して MA を核変換させるため、連鎖 反応による中性子増倍効果が期待でき、炉心の設計にもよ るが30倍程度の増倍が得られる.さらに、加速器の最大出 力を 30 MW に引き上げる.これはJ-PARC の30倍という大 きな出力であるが、J-PARC ではパルスビームであるとこ ろ、ADSではより大強度ビームの加速が容易な連続ビーム で良いので、達成可能な技術レベルと考えられる.

以上の3つの数字を掛け合わせると、70×30×30で 6.3万となり、先に述べた4万倍の開きを克服できる.実際 には、ADSプラントの稼働率を考慮したり、生まれた中性 子の全てがMA核変換に使われるわけではなく無駄に消費 されるものもあるため上述の手計算どおりにはいかない が、図2、3に示した設計のADSに対して詳細な計算を行 うと、ADSが4基あれば原子炉40基分に相当する年間1ト ンのMAを核変換することが可能であることがわかる.こ のように、高エネルギー陽子を重金属標的に入射すること による多量の中性子発生、未臨界炉心による中性子の増 倍、加速器の大強度化を組み合わせることにより、現実的 な量のMA核変換が可能である.

なお、MAではなくFPの場合には核分裂の連鎖反応が起こらないことから、未臨界炉心による中性子の増倍効果が なく、この増倍効果の係数30を何か他の効果に期待しなければならない。例えばこれを加速器の大強度化で補うとすれば、30 MWの30倍で1 GWクラスの加速器が必要となってしまう。加速効率(投入した電力に対し、得られるビーム出力の割合)を30%と高めに設定しても、1 GWのビームを得るためには3.3 GWの電力が必要であり、これは1 GW (100万 kW)程度の出力を有する通常規模の原子力発電所3基分に相当する。これだけの大電力を再生可能エネル ギーで安定に供給するのは不可能であり、化石燃料を使わないとすれば原子力発電に頼るほかなく、結果として放射 性廃棄物は減るどころか増えてしまうことになる。

1.6 海外の動向

海外では、ベルギーや中国などで積極的に ADS に関す る研究開発が進められている.特にベルギーでは、ベル ギー原子力研究センター(SCK CEN)により、MYRRHA [7] (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications)と名付けられた多目的の ADS を建設する計 画が進められている. MYRRHA は液体鉛ビスマス合金を

ターゲット材兼冷却材とする最大熱出力100 MWの研究炉 であり,超伝導線形加速器で加速された600 MeV, 2.4 MW の陽子ビームで駆動される.2.4 MW というビーム出力は, 図2,3に示した ADS のビーム出力 30 MW の約1 桁低い 規模である. MYRRHA は, 準工業規模 ADS による核変換 技術の実証,核融合炉材料照射,医療用 RI 生産,鉛冷却高 速炉開発,基礎研究等を目的としている.なお,出力が核 変換のための実用規模 ADS よりも低く多量の MA を核変 換できる能力を有しないため、核変換そのものは目的とは していない. 2018年10月, ベルギー政府は MYRRHA 計画 に対する 558 M€(約700億円)の出資を決定した.これに は、2019年~2026年にわたる100 MeV までの陽子加速器と 陽子ターゲット施設の建設,2027年~2038年にわたる同施 設の運転,および2019年~2026年にわたる加速器の 600 MeV 増強と未臨界炉心のための設計と R&D が含まれ る. 既にベルギーの Mol という街にある SCK CEN の敷地 内にて、100 MeV までの陽子加速器と陽子ターゲット施設 の建設が始まっている.

1.7 まとめ

分離変換技術は、原子力発電所の運転に伴い発生する高 レベル放射性廃棄物の負担を減らすことができ、さらに カーボンニュートラルにも貢献することができる、我々人 類にとって非常に有益な技術と考えられる.しかしなが ら、ADSそして分離変換技術の研究開発はまだ始まったば かりであり、研究開発分野としてチャレンジングな課題に 溢れている.特に若い研究者や技術者の方々には、是非、 ADSに興味を持っていただき、こうした研究開発にご協力 いただければ幸いである.

参考文献

- [1] 経済産業省エネルギー資源庁、"エネルギー基本計画"、 (Oct. 2021). https://www.enecho. meti.go. jp/category/ others/basic_plan/
- [2] 電気事業連合会:電気事業のデータベース (INFO-BASE) 2020.
- [3] T. Sugawara *et al.*, "Research and development activities for accelerator-driven system in JAEA", Prog. Nucl. Energy 106, 27 (2018).
- [4] https://j-parc.jp/c/index.html
- [5] J-PARC センター 核変換ディビジョン、"J-PARC 核 変換実験施設技術設計書 - ADS ターゲット試験施設 (TEF-T)-", JAEA-Technology 2017-003 (2017).
- [6] 日本原子力学会「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委 員会:分離変換技術総論(2016).
- [7] https://www.sckcen.be/en/projects/myrrha

●●● 小特集 J-PARC における加速器駆動核変換システム(ADS)の研究開発

2. J-PARC 核変換実験施設

2. Transmutation Experimental Facility at J-PARC

前川藤夫,武井早憲 MAEKAWA Fujio and TAKEI Hayanori 日本原子力研究開発機構 (原稿受付: 2022年1月20日)

加速器駆動核変換システム (ADS) の開発にあたっては、大強度陽子ビームに耐える材料の開発や陽子ビームで駆動される未臨界炉心の特性評価等、陽子ビームに関わる技術課題を解決する必要がある.そこで大強度陽子加速器施設 J-PARC では、実際に大強度の陽子ビームを利用した各種試験を行う核変換実験施設が検討されている.本章では核変換実験施設の概要と今後の方向性について紹介する.

Keywords:

J-PARC, transmutation experimental facility, accelerator driven system, proton beam, TEF-T, TEF-P, irradiation

2.1 大強度陽子加速器施設 J-PARC

茨城県東海村の日本原子力研究開発機構原子力科学研究 所の敷地内に、大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex, 図1)[1] がある. J-PARCでは、GeVオーダーにまで加速した世界屈指の MW 級大強度陽子ビームをターゲットに入射し、核反応に より中性子, ミュオン, 中間子, ニュートリノなどの多彩 な二次粒子ビームを作り出し、様々な実験に供している. これにより、原子・分子の構造観察から物質・生命の起源 を探る研究や、素粒子や原子核の研究から宇宙の始まりの 謎を解く研究などを進める、最先端の研究施設である. J-PARC は2008年に運転を開始し、現在、図1に示す3つ の実験施設が運転中である.第4の実験施設として、核変 換実験施設(Transmutation Experimental Facility, TEF) が計画された.図2に示すとおり、TEF は核変換物理実験 施設 (Transmutation Physics Experimental Facility, TEF-P)[2]および ADS ターゲット試験施設 (ADS Target Test Facility, TEF-T)[3]の2施設で構成される.本章で



図1 大強度陽子加速器施設J-PARC (参考文献[3]のFig.1.4を引 用).

Nuclear Transmutation Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

は,核変換実験施設計画の概要と,今後の施設検討の方向 性を中心に述べる.

ADS ターゲット試験施設 TEF-T 2.2.1 施設の目的

図3左に示すとおり、ADSでは液体鉛ビスマスのプール に陽子ビームを輸送する真空のビームダクトを上から挿入 した配置であり、ビームダクトの下端部分が陽子ビームを 通過させるビーム窓と呼ばれている.ビーム窓は厚さ 数 mm の金属板であり、加速器側の真空領域とターゲット



図2 J-PARC 核変換実験施設(参考文献[3]の Fig. 1.5 を引用).



corresponding author's e-mail: maekawa.fujio@jaea.go.jp

である液体鉛ビスマスとの境界を形成している.図3右に ビーム窓が置かれる環境を示すが、ビーム窓は陽子ビーム および鉛ビスマス中で発生した中性子による照射を受け、 照射脆化・硬化、スエリング、照射クリープ等の放射線損 傷が引き起こされる.また、高温で流動している腐食性の 高い鉛ビスマスにより、腐食や壊食を受ける.さらに、鉛 ビスマスの圧力にも耐えなければならず、極めて過酷な環 境に置かれている.このビーム窓が万一破損すると、加速 器側の真空領域に液体鉛ビスマスが流れ込むことになり、 運転を続けることができない.したがって、この環境に耐 えることのできるビーム窓の開発が、ADSの成立性を左右 する大きな課題の一つである.

TEF-Tの主目的は、このように非常に過酷な環境で用い られる陽子ビーム窓が工学的に成立するのかどうかを実験 的に確認することである. 鉛ビスマスターゲットの内部に 様々な構造材料の試料を設置し、大強度陽子ビームを入射 して照射を行い,照射後に試料の材料強度特性を測定す る. TEF-T では, 250 kW の大強度陽子ビームを用いるこ とにより実用 ADS 相当の照射量を達成可能であり、また 約500℃の高温かつ流動する液体鉛ビスマス合金中に試料 を設置することにより、世界で初めて実用 ADS 環境を模 擬できる実験施設となる. また、このような照射試験を通 じ,液体鉛ビスマス合金の取扱技術や核反応により生成す る放射性物質の取扱技術等, ADS開発に必要な要素技術の 開発を進める. さらに, 鉛ビスマスターゲットで多数発生 する中性子等を他の様々な用途に活用する多目的利用のた めの設備を併設し、施設の有効活用を図る. 半導体ソフト エラー試験のための高エネルギー中性子照射, RI 製造, 不 安定核ビームによる基礎物理研究等がその活用例である.

2.2.2 施設の概要

表1に TEF-T の諸元を,また図4に TEF-T の鳥瞰図を 示す.TEF-T には,図4のさらに右側に位置する J-PARC のリニアック加速器で加速した 400 MeV, 250 kW, 25 Hz のパルス状陽子ビームが導かれる.現在 J-PARC では,リ ニアックにより 25 Hz のパルス陽子ビームを図1に示した RCS に供給し,これがさらに下流の3つの実験施設に供給 されている.TEF-T 建設時には,リニアックを 50 Hz に増 強し,パルス電磁石によりパルスを交互に TEF-T と RCS に振り分ける.これにより,既存実験施設への 25 Hz の ビーム供給を維持したまま,TEF-T への 25 Hz のビーム供 給が可能となる.

TEF-Tに供給される 250 kW の陽子ビームは大強度であ るものの,これは本小特集 1 章で述べられた ADS のビー ム出力 30 MW と比べ約 2 桁低い値である. ADS ではビー ム窓への負荷を下げるためにビームの直径を数 100 mm に

	Table 1.4 を引	(参考文献[3]の	TEF-T の諸元	表1
--	--------------	-----------	-----------	----

陽子ビーム	400 MeV,250 kW $(3.9 \times 10^{15} \text{ protons/s})$
ビーム構造	パルス(繰り返し:25 Hz,パルス幅:500 μs)
ビーム形状	ガウス分布(最大電流密度:30 μA/cm ²)
ターゲット	液体鉛ビスマス合金(循環時最高温度:450℃)
ターゲット容器	ステンレス鋼(低温運転用)・高クロム鋼(高温
	運転用)



図4 TEF-Tの鳥瞰図(参考文献[3]の Fig. 2.6-1 を引用).

広げる. 一方で TEF-T ではビームの直径を数 10 mm に絞る. これにより 2 桁の ADS と TEF-T のビーム出力の差を 補い, TEF-T では ADS と同程度の電流密度で陽子ビーム を入射し, 材料照射に供することができる.

リニアックから供給された 250 kW の陽子ビームは, 図4中央少し左のターゲットステーション中心付近に設置さ れた鉛ビスマスターゲットに導入される. なお,その途中で 250 kW のうちの最大 10 W のビームが取り出され, TEF-P に供給される.このため, TEF-T と TEF-Pは同時運転が可 能である.取り出し方法については,2.4で述べる.

鉛ビスマスターゲットは、図5に示すとおりターゲット 台車の先端に取り付けられ、台車上にはターゲット容器に 液体鉛ビスマスを供給するための電磁ポンプや陽子ビーム による入熱を除熱するための熱交換器、膨張タンク等から なる鉛ビスマス循環系が搭載されている。ターゲット容器 は、放射線損傷でダメージを受けるとともに、容器内に設 置した照射試験板の取り出しのため、毎年交換される。

図6にターゲット容器の詳細を示す.ターゲット容器は 最外径150mmの二重円筒構造であり,温度制御された鉛 ビスマスが外筒と内筒の間から容器先端へと流入し,先端



図 5 ターゲット台車に搭載された鉛ビスマス循環系とターゲット容器(参考文献[3]の Fig. 4.1.5-1 を引用).



図6 ターゲット容器の詳細(参考文献[3]の Fig. 2.4-2 を引用).

部で反転して内筒を流れ下る.内筒内には40mm× 100mmの照射試験版が8枚設置されており,陽子ビーム および鉛やビスマスの原子核と陽子との核反応で発生した 中性子の照射を受ける.照射材料には,ADSのビーム窓材 候補であるSUS316LやT91(改良9Cr-1Mo鋼)が考えら れている.陽子および高エネルギー中性子による照射量は 年間最大で10dpaであり,高温鉛ビスマス流動下で2年間 の照射を行えば,図3に示した①~③の実用ADS環境を 模擬した照射が行える.照射後,ターゲット容器はター ゲット台車から切り離され,ターゲット容器を分解して照 射試験版を取り出す.照射試験版からさらに照射後試験に 必要な引張試験片等を切り出す.これらの試験片は原子力 科学研究所内のホットラボに輸送され,引っ張り試験や顕 微鏡観察等の照射後試験が行われる.

TEF-T 建設に向けて施設の基本設計が行われ,その結果 は2017(平成29)年3月に技術設計書[3]としてまとめられ た.また,施設の実現に向けては図5に示すような高温液 体鉛ビスマスを安全かつ安定して循環させることができる か等を確認するための各種試験が必要である.こうした鉛 ビスマスターゲット技術に関する研究開発については,第 3章で紹介されている.

2.3 核変換物理実験施設 TEF-P

2.3.1 施設の目的

ADSの未臨界炉心の特徴は、素性がよくわかっていない マイナーアクチノイド(MA)を核燃料として炉心に装荷 すること,及び陽子ビームを未臨界炉心中心に導入するこ との2点である.しかし、これらの特徴を備えた実験施 設は世界に無く,実験的研究がなされていない.そこで TEF-Pは、実験用の小出力の原子炉である臨界実験装置に kgオーダーのMA燃料を装荷するとともに、陽子ビームを 炉心中心に導入して未臨界炉心を駆動することにより, ADS 未臨界炉心の2つの特徴に起因する炉心の様々な特 性を実験的に明らかにするための施設である.具体的に は、①ウランやプルトニウムと比べ精度の低いと考えられ る MA の核データにより、どの程度の精度で未臨界度を予 測できるのか、

②炉心内で実際にどの程度の MA が核変換 されるのか、③加速器トラブルにより陽子ビームが止まっ たときに炉出力はどのように変化するのか等の研究を行う 施設である.

2.3.2 施設の概要

表2にTEF-Pの主要諸元,図7にTEF-Pの概念図,図8 にTEF-Pに設置予定の燃料集合体中心部を示す.TEF-P は,原子力科学研究所の1施設であるFast Critical Assembly (FCA)[4]の設計概念を踏襲した施設である.図7に 示すとおり,FCA同様,装置は水平2分割構造となってお り,2つの1/2格子管集合体で構成されている.格子管集 合体は停止中は分離,運転時には密着状態とする.格子管 集合体は5cm×5cmの格子管を51×51個並べたものであ り,図8右に示すとおり格子中に板状あるいはブロック状 の燃料や模擬物質(鉛ビスマス等)を装填した燃料引出し を装荷して組み立てられる.また,MAを用いた実験を行

表 2 TEF-P の諸元 (参考文献[6]の Table 1.2 を引用).

陽子ビーム	400 MeV, 最大 10 W (1.6×10 ¹¹ protons/s)
ビーム構造	パルス(繰り返し:25 Hz,幅:10 ns~500 μs)
最大核分裂出力	~500 W(参考 高速炉臨界実験装置 FCA の出
	力:2kW)
燃料集合体	水平2分割型
	格子管 51×51(2.8 mW×2.8 mH×2.6 mD)
	格子管寸法(5 cm×5 cm:FCA と同様)



図7 TEF-Pの概念図(参考文献[3]の Fig. 1.6 を引用).



図 8 TEF-P 格子管集合体の中心領域 (参考文献[3]の Fig. 1.6 を引用).

う際には、図8左に示すとおり炉心の中心領域に MA を含 むピン燃料を挿入して炉心を構成する.FCA と違い, TEF-P では最大10Wの陽子ビームを炉心中心のターゲッ トに導入できるのが特徴である.最大核分裂出力は500W を想定している.

2.4 レーザー荷電変換技術による微小出力陽子 ビームの取り出し

TEF-Tには、エネルギー 400 MeV,出力 250 kW の陽子 ビームが供給され、また、TEF-Pには、エネルギーは同じ く 400 MeV であるが、最大でも 10 W の陽子ビームが供給 される必要がある.TEF-P で行う実験では、試験内容に応 じ、ビームの出力や時間幅が数 ns から数十 μs の範囲の多 様な陽子ビームが必要になる。そのために、リニアックで 加速された大出力の負水素イオン(1個の陽子の周りを 2個の電子が回り、負の電荷を帯びた状態、H⁻)ビームか ら最大でも 2 万 5 千分の 1 という極めて微小な出力の陽子 (H⁺) ビームを安定して取り出さなければならない.

通常の加速器施設では、大出力陽子ビームから電磁石や 金属薄膜を用いて一部の陽子ビームを取り出している.し かしながら、この方法では時間幅の異なる陽子ビームを取 り出せない.また、電磁石の異常や金属薄膜の変形等によ り想定以上の出力の陽子ビームが取り出されるおそれがあ り,未臨界炉心を駆動するビームとしての安定性に課題が ある.このため,安定して微小出力陽子ビームを取り出す 方法を開発する必要があった.

開発に当たり、H⁻ビームの形状などをレーザーで診断 するレーザー荷電変換技術に着目した.すなわち、H⁻ビー ムに赤外線から可視光程度の波長を持つレーザー光を照射 し、H⁻から電子1個を剥ぎ取り、中性水素(H⁰)に変換す る技術である.ところで、この波長域のレーザー光ではH⁰ に残された電子までは剥ぎ取れず、電磁石で制御しながら ビームを輸送できない.そこで、H⁰ビームを金属薄膜に入 射させ、残った電子を剥ぎ取ってH⁺ビームに変換し、未臨 界炉心へと導くことにした.

また, 微小出力陽子ビームを取り出すもう一つの課題 は, 真空のビーム輸送ダクト内などにごく僅かに残ったガ スとH⁻ビームが衝突し, 1個の電子が剥ぎ取られ生成す るH⁰のバックグラウンドを除去することである. 著者らの 研究グループは, バックグラウンドを除去しながら所定の 出力のH⁺ビームを取り出すため, 電磁石内でH⁻ビームと 高出力レーザー光を衝突させる独自のアイデア[5]に基づ くレーザー荷電変換システムを開発した.

長時間安定して時間幅が短い(数ns)H⁺ビームが取り出 せることを確認するため,新たに開発したレーザー荷電変 換システムを既存の加速器(ビームエネルギー3MeV)と 接続し,試験を行った(図9)[6].この試験の目標は, TEF-Pで行う実験の要求より取り出したH⁺ビーム出力が 5~10W相当,出力変動が5%以下とした.さらに, J-PARCの運転スケジュールとの整合を図るため,取り出 し時間の目標を7日(延べ56時間)以上とした.このよう なH⁺ビームを生成するために,高出力パルス発振レー ザー(25.6W,1J/pulse,25Hz)を新たに開発した.さら に,レーザー光の照射位置を安定に制御するレーザー光の



図9 レーザー荷電変換システム(参考文献[6]の図5を引用).



図10 取り出されたH⁺ビームの出力(参考文献[6]の図11を引用).

輸送系も構築した. その結果, ビーム出力変動を約3%以 内に抑えながら約8W相当のH⁺ビームを約8日間(延べ 65時間)にわたり取り出すことに成功し(図10),当初の目 標を達成した[6].

また、時間幅が長い(数十 μ s) H⁺ビームを取り出すた め、高出力パルス発振レーザーを高出力連続発振レーザー (出力 196 W) に置き換えて実験を実施した結果、時間幅が 約 50 μ s の H⁺ビームを取り出すことができた[7].

以上の結果から、J-PARCにおける大出力陽子ビームから微小出力ビームを長期間安定に取り出すための制御技術の基礎を確立し、TEFに必要な要素技術を確立した.

2.5 実験施設計画の見直し

2.5.1 群分離・核変換技術評価タスクフォース

これまで説明してきた TEF-T および TEF-P からなる核 変換実験施設 TEF は, J-PARC の計画が動き出した2000年 頃に提案された施設概念である[8].以来20年以上が経過 し, ADS に関する研究開発環境も大きく変化した. 2021 年,文部科学省 原子力科学技術委員会 原子力研究開発・ 基盤・人材作業部会の下に群分離・核変換技術評価タスク フォースが設置され,群分離・核変換技術評価タスク フォースが設置され,群分離・核変換技術評価タスク され,同年12月23日に報告書「群分離・核変換技術評価に ついて」[9]が公開された.この中で J-PARC 核変換実験施 設の在り方についても記述されており,その要点は以下の とおりである.

- TEF-P, TEF-T による実験については、計算機シミュレーションの高度化や既存施設の活用を進めることで代替をめざす.ただし、TEF-T で予定していた陽子照射下、かつ高温鉛ビスマス流動環境下におけるビーム窓材料の実証試験は、代替困難である可能性が高い.
- TEF-P で使用を想定していた原子力機構保有の核燃料の一部(高濃縮ウラン、プルトニウム)が米国へ移送されたため、TEF-P で実施予定であった炉物理研究項目が大幅に制限される。
- このため、TEF-Tの機能を優先した試験施設として検討 することが妥当である。
- ADSの工学的課題解決に加え、多様なニーズへの対応の可能性を含め、既存の J-PARC の陽子加速器を利用可能な利点を最大限活用する施設仕様を検討することが望ましい。

この方針を受け,原子力機構では,実験施設計画の見直し を行う予定である.現時点での見直しの考え方を次節に示 す.

2.5.2 見直しの考え方

図11に見直し中の実験施設概念[10]を示す.実験施設の 第一目的は,ADSの工学的課題解決のため,高温鉛ビスマ ス環境下において大強度陽子ビームによるビーム窓材料の 照射を行い,候補材料の照射・腐食挙動を調べることであ る.したがって,TEF-Tが実験施設のベースライン設計と なる.施設の主な変更点は,TEF-Tの多目的利用を発展さ せ,半導体装置のソフトエラー試験,RI製造,核分裂炉お



図11 見直し中の実験施設概念.

よび核融合炉および加速器施設の材料照射などの多様な ニーズへの対応強化を図ることである.また,TEF-Pの敷 地を有効活用し,ホットラボを併設する.紙面の都合上, 以下,核融合炉材料の照射も可能な照射の機能について述 べる.

ADSを含む, J-PARC等の大強度加速器施設の出力増強 にあたっては、大強度加速器の開発と同時に大強度ビーム を受ける大強度ターゲットの開発も重要である.近年,加 速器の出力上昇に伴い、大強度ターゲットの開発が出力上 昇の律速段階になるケースが増えている.そこで、鉛ビス マスターゲット内での ADS 用材料照射に加え、ターゲッ トの前に照射場を設け、大強度加速器施設の窓材やター ゲット材の照射を行えるようにする.

核融合炉および核分裂炉材料の照射のニーズは非常に高 いが、世界的に材料照射専用の研究用原子炉の数は減少し ている. そこでこれらニーズに応えるため, 中性子束が高 いターゲットの周りの空間を照射に供する. ところで、中 性子等のエネルギーの観点から照射場を特徴づける最も重 要なパラメータは、変位損傷 (dpa) に対する He 生成の比 率 (He/dpa 比) である. 図12は、この2つの照射パラメー タと各施設の照射条件のマップを示す.また図13には, ターゲット周辺の He/dpa 比の分布を示す. ターゲット内 部のHe/dpa比は約100であるため,高エネルギー加速器材 料の照射に適している. 問題は, He/dpa比が10~15の核融 合,およびそれ以下の核分裂炉の照射場をどのように実現 するかである. その答えは図13に示されている. ターゲッ ト周辺の He/dpa 比は,陽子ビーム入射方向に対する角度 に依存し、10以上から1程度にまで変化する.そのため、 ターゲット周辺の前方および後方位置での He/dpa 比は, それぞれ核融合および核分裂炉材料の照射に適した値とな る. 照射量は、およそ1 dpa/y である. 照射量や照射体積の 限界から、本施設だけで核融合炉および核分裂炉材料の照 射ニーズ全てに応えられる訳ではないが、世界的な照射場 不足の中,貴重な照射場としての可能性を秘めている.

2.6 まとめ

大強度陽子ビームで駆動される核変換のための ADS 開 発にあたっては、実際に陽子ビームを利用した各種試験が



図13 鉛ビスマスターゲット周辺の He/dpa 比.

不可欠であり,そのための J-PARC 核変換実験施設の検討 が行われてきた.実験施設では核融合炉の開発に資する照 射等も行えることから,実験施設の実現に向けて少しでも 前に進めるよう,核融合分野の方々からご支援いただけれ ば幸いである.

参考文献

- [1] 大強度陽子加速器施設 J-PARC, https://j-parc.jp/c/in-dex.html
- [2] 原子力基礎工学研究センター 分離変換技術開発ディビジョン、"J-PARC 核変換物理実験施設(TEF-P)安全設計書", JAEA-Technology 2017-033 (2018).
- [3] J-PARC センター 核変換ディビジョン、"J-PARC 核変換実験施設技術設計書-ADS ターゲット試験施設 (TEF-T)-"、JAEA-Technology 2017-003 (2017).
- [4] 臨界実験装置 FCA, https://www.jaea.go.jp/04/ ntokai /anzen/anzen_05.html
- [5] 明午伸一郎 他: "YAG レーザーを用いた H⁻ビーム取 出し法の概念検討", JAERI-Tech 2002-095 (2002).
- [6] H. Takei et al., Plasma Fusion Res. 13, 2406012 (2018).
- [7] H. Takei *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. 58, 588 (2021).
- [8] 日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構共同 推進チーム、"大強度陽子加速器計画", JAERI-Tech 2000-003 (2000).
- [9] 群分離・核変換技術評価タスクフォース, https:// www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/106 /index.html
- [10] F. Maekawa, "A Plan of Materials Irradiation Facility at J-PARC for Development of ADS and High-power Accelerator Facilities", JPS Conf. Proc. 33, 011042 (2021). https: //doi.org/10.7566/ JPSCP.33.011042

● 小特集 J-PARC における加速器駆動核変換システム(ADS)の研究開発

3. 鉛ビスマスターゲット技術

3. Lead-Bismuth Target Technology

佐々敏信

SASA Toshinobu 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 J-PARC センター (原稿受付:2022年1月20日)

鉛ビスマス共晶合金(LBE)が、その核的・化学的特性から、次世代原子炉の冷却材や加速器駆動システム (ADS)の核破砕ターゲットとして有望視されている.LBEは重金属であり、核破砕ターゲットとしても長寿命放 射性核種の核変換システムの冷却材としても良好な特性を有している.一方、その利用の大きな課題の一つであ る構造材との共存性を向上するための様々な技術開発とともに、ADSによる核変換技術の早期実用化をめざして 進めている、LBEの高温運転、耐腐食性確保のための酸素濃度制御など最新の研究成果を紹介する.

Keywords:

lead-bismuth, spallation target, nuclear transmutation, accelerator-driven system, corrosion

3.1 はじめに

分離変換技術は,長寿命放射性核種の持つ放射性毒性に 起因する環境負荷の低減や,分離後の放射性廃棄物の処分 の効率化をめざす技術体系であり,その対象は,ネプツニ ウム,アメリシウム,キュリウム等のマイナーアクチノイ ド (MA)である[1].ここでは,核変換に最適化された専 用システムである加速器駆動システム (ADS: Accelerator -driven System) に用いる鉛ビスマス核破砕ターゲット技 術を解説する.

ADS は大強度の陽子加速器と MA 燃料を装荷した未臨 界高速炉心から構成され,未臨界炉心の中央に核破砕ター ゲットが配置される.加速器からの陽子を ADS のター ゲットに入射することで,核破砕反応により1陽子あたり 30個程度の中性子が生成する.この核破砕中性子を連続的 に供給することで,ターゲットの外周に配置された未臨界 炉心内で核分裂連鎖反応が生じ,MA が核変換される.核 変換用 ADS の研究は世界的に進められており,特に欧 州・中国が積極的である.

3.2 液体鉛ビスマス共晶合金(LBE)の特性

日本原子力研究開発機構 (JAEA) では、ADS による核 変換の実現をめざした研究開発[2]を進めており、ADS の 核破砕ターゲット及び冷却材として鉛ビスマス共晶合金 (LBE:Lead-Bismuth Eutectic Alloy)を採用している.LBE の代表的な物性値[3]を**表**1に示す.LBE は、鉛(45%)と ビスマス(55%)からなる共晶合金である.融点は、鉛 (327.55℃)、ビスマス (271.45℃)[4]の単体時と比べて 125℃と低く、高速炉によく用いられるナトリウム (97.79℃)と近い値を持つ.このため、ナトリウム冷却高速 表1 LBE の代表的な物性値.

項目	記号	単位	値
融点	T _m	°C	125
沸点	$T_{\rm b}$	°C	1670
密度* ⁾	ρ	kg/m ³	10337
定圧比熱*)	$C_{ m p}$	J/kg • K	145.75
熱伝導率*)	λ	W/m · K	11.73
熱拡散率*)	α	m^2/s	7.83×10^{-6}
粘性率*)	η	Pa·s	18.41×10^{-4}
体積膨張率*)	$eta_{ m p}$	K^{-1}	12.80×10^{-5}
		*)::	温度条件:300℃

炉の技術を応用できるとともに、ナトリウム冷却高速炉と ほぼ同様のヒートバランスで炉心設計を行うことができ る. また, LBE は沸点が1670℃と一般的な高速炉向けの構 造材の融点 (SUS316で約 1400℃) よりも高く, 液相の温度 範囲が広いことも特長である.このため,炉内での気化に よって冷却能力が大幅に低下することや、局所的な温度上 昇を誘発することが無い. また, ナトリウムや他のナトリ ウム系合金, リチウム等に比べて化学的活性が低く, 仮に 水や空気と接触したとしても、爆発的な反応を生じないと いう特長を持つ.このため、中間的な熱交換器を介するこ となく水を使った冷却装置を組み合わせることができる. また、メンテナンス時などに、不活性ガス雰囲気を維持す ることなく作業を行うことができるため、作業効率が高 い. さらに、水と比べて10倍以上高い熱伝導率、数10倍以 上の熱拡散率をもつため、除熱冷媒として優れた性質を持 つ.以上のことから、除熱系統の小型化が実現できる可能 性があり、次世代の原子炉冷却材としてもLBEに関心が寄 せられている. ADSへの適用については, LBEを構成する

Nuclear Transmutation Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

author's e-mail: sasa.toshinobu@jaea.go.jp

鉛,ビスマスとも重金属に分類されており,原子核内に多 くの核子を持つことから,高エネルギー陽子が誘発する核 破砕反応で生じる核破砕中性子の生成量が多い利点を有す る.また,中性子の散乱断面積が大きく中性子吸収が少な いため,負の冷却材ボイド反応度を持つ炉心が構成しやす い.さらに,核変換に最適な高速中性子スペクトルを得や すいという核変換炉に良好な核的な特長を持つ.

上記のような特長を持つ一方, LBE は鋼材に対する腐食 性が高いことが知られている.LBEは、鋼材の主要な合金 成分である鉄, クロム (Cr) 等だけでなく, オーステナイ ト系ステンレス鋼の成分であるニッケル (Ni) やフランジ 等のシール材に用いられる銅の溶解度が大きい.このた め,腐食の抑制ならびに耐腐食性材料の開発が大きな課題 である.これまでに実施された静的,流動下での腐食試験 から得られた知見として, ① 450℃ 以上の温度領域におい て,温度上昇とともに著しい腐食が生じること,② Ni を含 まないフェライト/マルテンサイト (F/M) 鋼に比べ, Ni を含むオーステナイト鋼の耐食性が劣ること、③一般に鋼 材中のCrの濃度を高めると耐食性が向上し, アルミニウム やシリコンを含む鋼材や表面改質材ではより耐食性が向上 すること、④ LBE の流動下ではより腐食が進行し易く、特 に系統内に温度差がある場合には質量移行により腐食が加 速されること、⑤LBE中の溶存酸素濃度によって腐食挙動 が異なることが知られている.これに加え、粘性が低い、 プラントル数が小さい,表面張力が強いなど,液体重金属 の持つ流体力学的な性質によって LBE は複雑な流れを形 成しやすく, 密度が高い点から, 系統流路の屈曲部や拡大 /縮小箇所などの流れの向きが急に変化する箇所,流速が 極端に速い箇所では壊食に注意する必要があり、系統内で の LBE の流速は 2 m/s 以下が推奨される. また, 重金属で あることは、原子力システムの耐震安全性の確保の上では デメリットであり、JAEAの提案するADSの技術的課題の 一つとなっている.

図1に,酸素濃度を制御しない状態でのLBEによる構造 材の腐食例を示す.316ステンレス鋼製の配管に400℃の LBEを流速約1m/sで3000時間流したものである.腐食と ともに配管内面からの結晶粒の剥離が見られ,最大で年間 約300 µm の腐食量を確認している[5].



図1 LBE による316ステンレス鋼配管の腐食.

欧州の実験や JAEA での非流動下での LBE 浸漬実験で は、LBE 中の溶存酸素濃度を適切な範囲に制御し、構造材 料の表面を酸化皮膜で被覆すれば、母材が LBE と直接接触 しないため、腐食量を大幅に低減できることがわかってい る.このため、LBE を用いた循環系での LBE 中酸素濃度制 御技術の確立が重要である.

LBE に含まれるビスマスに中性子を照射すると,中性子の捕獲反応からアルファ崩壊するポロニウムが生成する. ポロニウムはカバーガスを介して揮発し,系統外に漏洩す る可能性があるため,揮発率や他の元素との化合物の形成 等について数値解析を進めている.また,実際に中性子を 照射した LBE から揮発するポロニウムを用いたフィルタ による除去性能試験を通じた検証を行い,設備設計に活か している[6].ポロニウムのほか,環境への影響が懸念さ れる物質としてトリチウムや水銀等が問題となるため,放 出時の化学形態や放出率などのシミュレーション環境の整 備を進めている[7].

JAEA では、現在は基礎研究段階として、LBEの利用に 関わる基礎研究や共存性の高い構造材料に関する研究、腐 食抑制のために微量の酸素をLBEに添加して鋼材表面に 酸化皮膜を形成して腐食を抑制する技術の研究等を実施し ている.また、研究レベルを基礎研究段階から工学研究段 階に進めるため、大強度陽子加速器施設J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)にLBE ターゲット を設置し、大強度陽子ビームを用いた工学技術試験の実施 をめざしている.

3.3 LBE 核破砕ターゲットに関する研究開発

ADSの特徴的な構成要素である核破砕ターゲットは,加 速器からの陽子ビーム輸送管終端部に設置され,その境界 は陽子ビーム窓と呼ぶミリ単位の金属板により形成され る.陽子ビーム窓は,ビーム通過に伴う照射損傷と発熱を 受けると同時に,ターゲット及び未臨界炉心由来の中性子 の照射を受ける.また,LBEの流動による腐食が懸念され る上,400℃~500℃といった高温での構造強度が要求され るなど,厳しい使用環境に晒される.これらの環境を的確 に把握し,陽子ビーム窓の合理的な設計と寿命評価を行う ことが ADS の運転の安定性を確保する上で重要となる. 材料照射に関する試験では,スイス・ポールシェラー研究 所の SINQ 施設において2006年に 590 MeV-0.8 MW の陽子 ビームを4箇月間照射した MEGAPIE 国際共同実験 [8] を 通じて,比較的低温ではあるが流動 LBE 環境下での材料 データが取得されている[9].

J-PARCに設置を計画している出力 250 kW 級核破砕 ターゲットの概念を図2に示す[10].

この核破砕ターゲットは、高温で流動するLBE内で陽子 及び核破砕中性子の混合照射を効率よく行うことを目的と して設計している.陽子ビーム入射部に照射試料を設置す るため、冷却材入口側となる外管と冷却材出口に繋がる内 管から成る二重円筒構造とし、陽子ビーム入射部でLBE 流れが反転し、反転部直後に設置した照射試料に陽子ビー ムがエネルギーをほとんど損失することなく照射される構



図2 材料照射用 LBE ターゲット概念.

造である.ターゲットに陽子ビームが入射する部位(ビーム窓)では、LBE 流れによる動圧とともに、ビーム入射に伴う局所的な発熱により引き起こされる熱応力が発生する.この力を緩和するため、ビーム窓部は複数の曲面を組み合わせた湾曲構造とし、実際の ADS に比肩する高い陽子ビーム密度での長時間照射を可能としている.

核破砕ターゲットとして LBE などの液体金属を用いる 場合,高温運転への対応,耐腐食性確保のための液体金属 の純度管理,核破砕反応に伴う生成物の液体金属中での挙 動など,液体金属の取扱技術の確立が必要となる.以下に, JAEAにおいて実施しているLBE取扱技術の研究開発を紹 介する.

3.3.1 LBE ループ運転実証試験

後述する超音波による流量センサをはじめとするループ 構成機器類の開発を含め、実際のLBEループを適正かつ安 全に運転する技術を実証するため,核破砕標的循環試験装 置(IMMORTAL: Integrated Multi-purpose MOckup for Real-scale TArget Loop) を製作・運用した. IMMORTAL は、J-PARC LBE ターゲットの一次冷却系(LBE)および 二次冷却系(加圧水)の実証試験を行うためのモックアッ プ試験装置である.将来的な計画として,陽子ビーム照射 下で運転される J-PARCLBE ターゲットと同一の流量・温 度・酸素濃度条件で運転することで、照射試験との比較に 資する非照射環境下での材料腐食データの取得が可能な設 計としている.本装置は、実機と同形状のターゲット容器 試験体をはじめ、LBE のインベントリ、配管、機器配置だ けでなく実規模相当のサイズ、形状、性能を有する機器類 により構成しており,系統の熱挙動の検証を含めた循環 ループ特性の評価、計装や構成機器の性能評価も可能であ る. IMMORTAL の装置外観を図3に示す.

IMMORTALでは、ループ最高温度 500℃ での運転、温 度差を付与した非等温運転、J-PARC の1サイクルを想定 した30日間の連続運転などの運転実証を段階的に進め、 ターゲットの安定運転に必要な機器開発を進め、実機ター ゲットの安全・安定な運転の見通しを得てきた. IMMOR-TAL には、予熱ヒーター制御、温度監視を含め総数40本以 上のK型熱電対が設置されているほか、LBE 中の酸素濃度 を監視・制御するため、後述するPt/Air型酸素濃度計を高 温 LBE 側、低温 LBE 側の 2 ヶ所に設置することができる. 今後、これらの計測システムを用い、将来の ADS 設計に資 するための LBE ループシステム解析コードの検証用の実



図3 核破砕標的循環試験装置.

験データの取得等を進める計画である.

3.3.2 LBE 計測技術の開発

LBE ループを安全に運転するためには,ループ各部での LBE の温度,流量,酸素濃度等を知るための信頼性の高い 計測機器類が必要となる.温度計測については熱電対が利 用可能であり,大きな開発は不要であるものの,その他に ついては高温の LBE に対応する機器開発が不可欠となる. なお,系統圧力についても計測することが理想的である が,LBE を含む液体金属ループは一般的に常圧で運転され る場合が多いため,用途は限定的となる.

流量計測では、羽根車式に代表される、流体が直接接触 することにより計測を行う方法があるが、高温かつ金属類 へのLBEの腐食性が問題となるため,伝播時間差式超音波 流量計の開発を進めた、超音波流量計は、発振された超音 波の受信器までの伝播時間が、計測流体の流速に比例して シフトする量から流速を求める計測器である.計測部には 小型の超音波発振器と受信器のみが設置される構造から, 計測流体との接触部が小さいこと,摺動部を伴わず腐食に 伴う破損の可能性が低いこと、センサ自体が流れを阻害し にくいこと、初期設定後の頻繁な校正が不要であり、高放 射線場でのメンテナンス性に優れることなどの特長を有す るほか、ナトリウム冷却高速炉向けに実用レベルのセンサ が開発されている. JAEA では、流路中にセンサのプラグ を挿入して計測する接液型センサの開発[11]を経て、配管 外部にセンサを設置し、流れを乱さない上にセンサが腐食 しない非接液型センサの開発にも成功し、両センサの計測 信頼性を確認するとともに、長時間の安定運用を実証して いる。

鋼材に対して強い腐食性を示す LBE の循環系を運用す る上では,溶存酸素濃度の状態を監視し,適切に管理する 技術が不可欠である.このため,酸素センサの校正試験装 置を設置し,酸素センサの開発やループ型試験装置への導 入前の動作確認を実施し,センサ特性の把握と性能評価試 験を行っている. 高速炉の構造材として実績が豊富なステ ンレス鋼や高クロム鋼と LBE との共存性を確保するには、 LBE 中の酸素濃度を 10⁻⁶~10⁻⁷ wt%の濃度に調整し, 鋼 材表面に酸化皮膜を形成する必要がある.酸素濃度を計測 する手法として,一般にガルバニ電池式等の複数の手法が あるが、LBE 中の酸素濃度を計測するセンサには、固体電 解質としてイットリア安定化ジルコニア (YSZ) を用いた ジルコニア式が多く採用されている.ジルコニア式は,高 温中で YSZ を介して酸素イオンが酸素濃度の高い箇所か ら低い箇所へ移動することによって電位差が生じ、発生し た起電力と温度を計測することでネルンストの式から媒体 の酸素濃度を導出するものである. LBE 用酸素センサの YSZ 内部に封入する参照極として、ベルギーでは Bi/Bi₂O₃ 型が、ドイツでは Pt/Air (プラチナ塗布・大気参照) 型が 用いられている. Bi/Bi₂O₃型は密閉構造であり, YSZ 破損 時に系統からの LBE の外部漏洩のリスクが少ないことが 利点として挙げられる反面, JAEA が想定している LBE 循環系の温度条件ではビスマスが溶解するため、センサー の設置方向に制約がある他、使用中に Bi2O3 が徐々に消費 されるため、センサの寿命が Bi2O3の封入量に依存するこ とがデメリットとなる. Pt/Air 型は, Bi/Bi₂O₃型よりも出 力が高く、参照極が気体(空気)であるため設置方向に制 約が無い上に、継続的に空気を導入することにより、長期 間の計測が可能である。一方, YSZ 破損時に, 継続的にセ ンサに空気を導入するための導入孔から LBE が外部へ漏 洩する恐れがある. このため, JAEA では, YSZ 破損時に 放射化した LBE が外部に漏洩しない独自の構造を有する 新しい Pt/Air 型センサを開発し、流動 LBE 中の酸素濃度 制御技術の開発を進めている. JAEA で開発した Pt/Air 型酸素センサの外観を図4に示す.

3.3.3 LBE 中材料腐食挙動試験

前述のように、LBE 中の材料腐食を抑制するには、LBE 中酸素濃度の調整が不可欠である. JAEA では、酸素セン サの開発とともに、ループの自由液面上にあるカバーガスを 介して酸素ガス・水素ガスを適宜添加して LBE 中酸素濃 度を制御するシステムの開発を進め, LBE ループでの自動 制御を実現した.この酸素濃度自動制御により,LBE 中で の長時間の材料腐食挙動試験を実施可能となったことを受 け、様々な材料の腐食試験を実施している. 高温鉛ビスマ ス流動腐食試験装置(OLLOCHI: Oxygen-controlled Lbe LOop for Corrosion studies in HIgh-temperature) は,将来 の ADS 開発に向けて,酸素濃度制御された LBE 流動下に おける ADS 候補材料の腐食データを、広範囲の温度・流 量条件下で取得することを目的としている.図5に装置の 外観を示す. 最高運転温度は, 実用 ADS の運転温度を包含 する 550℃ としており、加熱器~熱交換器間の高温部には 改良9Cr-1Mo鋼(T91)や2-1/4Cr-1Mo鋼(SFVAF22)等を使



図 4 JAEA が開発した Pt/Air 型酸素センサ.

用している.本装置の特長として、3本の腐食試験用流路 が設けられている.それぞれの流路に独立したバルブ、流 量計,加熱器が設置されており,異なる流量,温度条件下 での材料腐食試験を同時に行うことができる.

腐食挙動に大きく影響するLBE中酸素濃度は,膨張タン クの自由液面からカバーガスに混合した制御ガス(酸化 時:Ar-5%酸素ガス,還元時:Ar-5%水素ガス)により運 転期間中安定して自動制御される.腐食試験時の酸素濃度 の経時変化を図6に示す.流動下腐食試験で重要となる試 験片近傍のLBE流速は,内挿管型試験片ホルダの形状を調 整することで,最大1~2m/sに設定できる.試験片ホルダ は,膨張タンクを介して各試験用流路に設置する構造と なっており,一次系に充填したLBEをドレンすることなく 試験片ホルダの交換が可能である.

実際のターゲットの運転環境では、陽子・中性子照射の ほかに熱応力、循環LBEによる動圧等が印加された状態で 構造材料がLBEの流動に晒される.高温かつLBE流動条 件下で試験片に応力を負荷した状態での腐食試験は世界的 にもごく稀であり、極めて重要な実験データである.この ため、本装置の中央の試験流路には、材料試験機を設置し て試験片のLBE流動下での応力負荷試験を行うことがで きる機構が採用されている.これにより、ADSの設計に資 する非照射下での応力負荷状態における材料試験データを



図5 高温鉛ビスマス流動腐食試験装置.



流動 LBE 環境下で取得可能としており,将来の ADS 設計の信頼性に資するデータ取得を進めていく.

3.4 まとめ

LBE の原子力利用は、これまで潜水艦や研究炉などに限 定されていた.しかし、その優れた核的・化学的特性から、 小型モジュラー炉や ADS といった次世代原子炉の主要冷 媒として注目されている.特に、LBE 冷却 ADS は、分離変 換技術の重要な要素として世界的に開発が進められてい る.JAEA では、LBE 冷却 ADS の大きな課題である構造材 との共存性の向上や計測制御技術開発とともに、ADSによ る核変換技術の早期実用化をめざして、研究開発を進めて いる.

参考文献

- [1] 日本原子力学会:分離変換技術総論(2016).
- [2] 日本原子力研究開発機構における長寿命核種の分離

変換技術に関する研究開発の現状と今後の進め方, JAEA-Review 2008-074 (2009).

- [3] OECD/NEA: Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Material Compatibility, Thermal hydraulics and Technologies 2015 Edition (2015).
- [4] 日本機械学会: 伝熱工学資料 改訂第4版 (1986).
- [5] S. Saito *et al.*, J. Nucl. Mater. **431**, 91 (2012).
- [6] T. Obara *et al.*, Prog. Nucl. Energy 53, 1056 (2011).
- [7] S. Miyahara et al., Nucl. Eng. Des. 352, 110192_1 (2019).
- [8] W. Wagner, Proc. Int. Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators (2009).
- [9] S. Saito *et al.*, J. Nucl. Mater. **534**, 152146_1 (2020).
- [10] J-PARC 核変換実験施設 技術設計書 -ADS ター ゲット試験施設(TEF-T)-, JAEA-Technology 2017-003 (2017).
- [11] H. Obayashi *et al.*, Proc. NUTHOS-11, N11P0107, 10 p., in USB Flash Drive. (2016).

●●● 小特集 J-PARC における加速器駆動核変換システム(ADS)の研究開発

4. 陽子ビーム技術とニュートロニクス

4. Proton Beam Technology and Neutronics

明午伸一郎,中野敬太,岩元大樹 MEIGO Shin-ichiro, NAKANO Keita and IWAMOTO Hiroki 日本原子力研究開発機構 (原稿受付: 2022年1月20日)

加速器駆動核変換システム (ADS)の実現や J-PARC で建設を進めている ADS ターゲット試験施設 (TEF-T) の建設には,陽子ビーム取扱技術の開発や GeV 領域の陽子に対するニュートロニクス (中性子工学)の詳細な検討が必要となる.このため J-PARC の核変換ディビジョンでは,J-PARC 加速器施設などで研究を進めてきた.本章ではこれらの内容に関して紹介する.

Keywords:

beam flattening, nonlinear beam optics, beam monitor, displacement cross section, nuclide production cross section

4.1 緒言

近年の大強度加速器の発達により、その様々な利用が展 開されている. J-PARC では、工学および物理研究のため 2000年より加速器施設の建設に着手した.この施設の一つ に、ターゲットとなる原子核に陽子を入射し、その原子核 が中性子や陽子などの核子を多数放出する核破砕反応を利 用した核破砕中性子源である物質・生命科学実験施設 (MLF) がある. 核破砕反応において中性子生成数は, 陽子 ビームの運動エネルギーにビーム電流を乗じたビーム出力 に比例するため、大強度の中性子を得るには高い出力を持 つ大強度陽子加速器が必要となる. MLF は2008年に運転 を開始し、既に陽子ビーム出力 700 kW の運転を行ってい る. また, 安定な大強度のパルス中性子ビームを利用者に 供給しており、数日間の短期間ながら目標としていた 1 MW の利用運転を2020年に行った.陽子ビームの入射に より標的で生成するニュートリノやK中間子などのハドロ ンを利用した素粒子・原子核物理の実験が、ニュートリノ 実験施設およびハドロン実験施設で繰り広げられている. 上記の実験施設は J-PARC の第一期計画と位置付けら れ、2008年頃より様々な二次粒子を利用者に提供してき た.

原子力発電所の使用済み核燃料には、燃焼しなかったU の他に、核分裂反応や中性子捕獲反応等により生成した放 射性物質が含まれる.これらの放射性物質の中には、人体 に対する有害度や環境負荷が比較的大きく半減期の長いい Np, AmおよびCmなどのマイナーアクチノイド(MA)が 存在する.これらを選択的に分離し、その物質の特性に応 じて処理・処分できれば、使用済み核燃料からの環境負荷 を大きく低減できる可能性がある.日本原子力研究開発機 構 (JAEA)では、有害な元素を分離し、核反応により異な る元素に変換する「分離変換技術」の研究開発を進めてい る.この技術の一環として,加速器と未臨界原子炉を組み 合わせ,運動エネルギー数 GeV の高エネルギーの陽子を Pb や Bi などのターゲットに照射し,発生した中性子によ り MA を主に核分裂反応で連鎖的に核変換するシステムを 「加速器駆動システム (ADS)」と称する.JAEA が提唱す る ADS[1]では,数 GeV の高エネルギー陽子の大強度ビー ム (ビーム出力 30 MW)を鉛・ビスマスからなる液体金属 (LBE) ターゲットに入射し,核破砕反応により生成した中 性子を未臨界となる原子炉を駆動する中性子の源として利 用する.

第二期計画として J-PARC は、分離変換技術の推進のた め ADS ターゲット試験施設 TEF-T[2]の建設を計画し た. ADS において重要な開発項目の一つとして、加速器側 の真空領域と LBE ターゲットとの境界となるビーム窓が 挙げられる. ビーム窓は、大強度の陽子ビームに晒され、 LBE 中で発生した中性子による照射を受け、さらに高温で 流動する腐食性の高い LBE による腐食や壊食を受けるた め、照射や腐食に伴う材料特性の評価が、ADS の研究を進 める上で重要となる. TEF-T は ADS の開発を進める上で 重要な施設と位置付けられており、現在は、同じ研究目的 で建屋などを見直した新規の実験施設の建設計画が J-PARC で進められている.

筆者らは J-PARC の陽子加速器施設および MLF などの 施設において, ADSおよび新規の実験施設の建設に向けた 陽子ビーム取扱技術およびニュートロニクス(中性子工 学)の研究開発を行ってきた.本章では, ADSの実現に向 けた陽子ビーム取扱技術およびニュートロニクスに関する 開発状況に関し紹介する.

Nuclear Transmutation Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

corresponding author's e-mail: meigo.shinichiro @jaea.go.jp

4.2 陽子ビーム取扱技術開発

J-PARCでは、ADSのターゲットに関する研究開発を精 力的に行っており、重要課題の一つとして液体金属ター ゲットに接するビーム窓の開発が挙げられる. 窓の健全性 の確保のためには、ビーム電流密度の抑制が必要となる が、一般に用いられる線形ビーム光学では、ビームの拡大 により密度の減少をできるものの、標的周辺部の熱負荷が 増大するため適用できない. パルス電磁石によりビーム形 状を平坦にする手法(ラスタリング)は、電流密度を抑え ることができるものの、パルス電磁石の停止時において著 しい電流密度の増加が懸念される. ラスタリング用のパル ス磁石は、何らかの異常により実際に停止したことがある ため、JAEA 提案の ADS はラスタリングを適用していな い. ADSの安定な運転には、新規手法に基づく電流密度の 低減化技術の開発が必要となる. さらに, ADS のような大 強度陽子加速器施設では, ビームが正しく標的に入射する ことを観測するビーム診断技術の開発も重要となる.診断 機器も大強度陽子ビームに晒される環境に設置するため, 大強度陽子ビームに耐えられる機器の開発が必要となる.

4.2.1 非線形光学によるビーム整形技術開発

ADS のビーム窓と同様に、MLF の核破砕中性子源とし て用いられる水銀標的の容器(SUS316L)は、大強度の陽 子ビームに晒されることにより損傷する. ADSと同様に施 設の安定した運転のためには、標的に入射する陽子ビーム の電流密度を下げて損傷を抑えることが重要となる.四極 電磁石を用いた一般的な線形ビーム光学の場合において, ビーム形状は図1に示すビーム位置と角度の位相空間分布 により決定される.通常の加速器の場合には、位相空間分 布は2次元の楕円状のガウス分布となり、ビーム形状 (プ ロファイル)も任意の場所でガウス分布となる.位相空間 での操作により, ビームプロファイルを平坦な形状に整形 すれば電流密度を下げることが可能となる.八極電磁石等 の多重極磁場の適用により、磁場の非線形性により位相空 間分布は変形できる。この非線形光学によりビームを成型 できることが知られていた.このビーム整形法は、材料に 均一のビームを照射するため、1980年代から米国の Brookhaven National Laboratory (BNL) などの加速器施設で用 いられてきた.しかし、この手法では副作用としてビーム ロスが発生する事が知られており, また非線形光学による ビーム調整法は、線形光学による方法と異なり複雑なた め、ビームロスを抑えて平坦となる条件が解明されていな



図1 線形光学(左)と非線形光学(右)による位相空間分布の 例.線形光学では常に楕円の分布となる.

かったため、ビームロスの抑制とビーム形状を平坦にする 条件を明確にすることが必要であった. MLF の陽子ビー ム輸送施設(3NBT)[3]と協力し、八極磁場を用いた非線 形光学の研究を進めた、ビーム形状はビーム直交方向(横 方向)のエミッタンスで規格化した八極磁場の強度(K*) と、八極磁場と標的間のベータトロン位相進行 (ø) におけ る余接 (cot ø) の 2 つのパラメータで特徴づけられること を明らかにした[4]. この条件は一般解となり、 ビームロス とピーク電流密度の両者を抑えた最適となる条件も明確に した. ビーム光学の調整により, 適切な
ø とすることで八 極電磁石は標的上流の任意な位置に設置でき, MLF では 陽子ビーム輸送施設に八極電磁石を設置しビーム整形を 行った.製作した八極電磁石を図2に示す.本手法では ビームの水平方向および垂直方向について、それぞれ独立 に整形するため、2台の八極電磁石を用いた.製作後に ホールプローブを用いた磁場測定の結果、八極電磁石の磁 場分布となる3次関数の分布を得ることを確認した (図2). 製作した八極電磁石とビームプロファイルモニタ による測定の結果,標的におけるビームプロファイルは予 想通りの分布となることを確認した(図3).中性子源の ビーム入口には、遮蔽体からなる長方形状のビーム入射孔 があるが、ビーム形状はこれに合致した形状となった.本 ビーム 整形により、ピーク電流密度を線形光学に比べ約 30%低減させることができた.またビームロスも十分小さ くすることができ,数日間の1MW 運転においてビームラ インの残留線量率は許容できる値となることを確認した. 既に MLF では本技術を適用し、ピーク電流密度を抑えた



図2 MLFの標的上のビーム電流密度の低減のために製作した八 極電磁石とその磁場分布の測定と計算値の比較.



図3 線形光学(a)と八極電磁石を用いた非線形光学(b)による MLFのビームプロファイルの測定値と計算値との比較.図 の上下に水平および垂直方向のプロファイルの比較をそれ ぞれ示す. 運転を継続している.八極磁場を用いた手法は Oak Ridge National Laboratoryの核破砕中性子源(SNS)において建 設が進められている第2ターゲットステーションで用いら れる予定である[5].多重度を増した12極電磁石などの適 用により,ビーム電流密度をさらに低減できる可能性もあ り,本技術の今後の発展により,ADS や TEF-T において さらにビーム窓の損傷を抑えた運転が可能となることが期 待できる.

4.2.2 大強度陽子ビームプロファイル測定技術開発

ADSのみならず大強度陽子加速器施設では、標的に入射 するビームの位置やその幅を監視するビーム診断技術が重 要となる. ビーム位置は、電極に生じる壁電流により導出 するビーム位置モニタ (BPM) が適用できるものの、大強 度ビームに耐えられビーム幅を測定できる測定手法はこれ までにない. J-PARC の MLF では, 放射線に対する優れた 耐久性を有する、炭化ケイ素 (SiC) 製のワイヤを複数用い た、マルチワイヤ型プロファイルモニタ (MWPM) (図4) の二次電子電流により、ビームプロファイルを測定してい る[6]. MLF ではこれまで 700 kW ビームによる長期間の 利用運転を行っており、ビームによる SiC ワイヤ欠損の経 験はこれまで無い. MLFの1 MW 運転時ではピーク電流密 度は約6µA/cm²となる[4]. JAEA が提案する ADS や TEF-T では MLFの6倍となる30µA/cm²のピーク密度が 計画されており、SiC がこの大電流密度の長期の使用に耐 えられるかどうかは不明となる.

大強度ビーム運転における SiC のワイヤの耐久性を調べ るため,低エネルギーの重イオンビームを用いて実験を 行った.この手法は核融合材料の試験でもよく用いられ る.低エネルギーの重イオンビームは、単位電流で数 GeV 陽子の百万倍の弾き出し損傷を与えるため、弾き出し損傷 を効率的に与えることができる.量子科学技術研究開発機 構 (QST) のイオン照射施設 (TIARA) において、10 MeV のNiイオンビームを用い,SiCに生じる二次電子電流の経 時変化を測定した[7].入射イオンビーム電流に対する SiC ワイヤの二次電子の割合を,弾き出し損傷量 dpa (4.3.1節参照)の関数として図5に示す.SiCの二次電子 電流は、ワイヤ表面において 3.3 dpa の照射損傷量に対し、 僅か6%程度の低下に留まり、ADSとTEF-Tの照射条件 (30 µA/cm²) において約6,000時間の運転に耐えうる可能 性があることを示した. Ni イオンの飛程はわずか 2 µm と なり,表面と飛程付近となるブラックピークの損傷量は



図4 MLFの水銀標的の直前に設置した、SiC ワイヤを用いた ビームプロファイルモニタ (MWPM).



図5 SiC の二次電子放出率の測定結果.

10倍異なり, さらに二次電子の飛程も詳細に検討する必要 があるため, 今後の研究が必要となる.

ADS のビームプロファイルモニタとしては, SiC ワイヤ を用いた手法の他に, ビーム窓などのビームによる温度上 昇を赤外線により測定する手法や, 窓に蛍光体を塗付し蛍 光量による測定する手法の開発も進めている.スウェーデ ンの Lund に建設中の 5 MW のビーム出力を有する欧州核 破砕中性子源 (ESS)[8]との協力により研究を進めている.

4.3 ニュートロニクスに関する研究

ADS は数 GeV 陽子を標的に入射するため,熱エネル ギーから数 GeV にわたる広いエネルギー領域でのニュー トロニクスが ADS において重要となる.原子炉や核融合 炉のために,20 MeV までのエネルギー領域のニュートロ ニクスの研究は原子炉やD-T中性子を用い進められている ものの,高エネルギー領域のニュートロニクスは実験デー タが十分ではない.筆者らは,J-PARCの3 GeVシンクロト ロン加速器施設(RCS)で加速された陽子ビームを用い, 様々な陽子に関するニュートロニクスの研究を進めてい る.RCSでは,ビームを出射するタイミングの変更により, 陽子の加速エネルギーを変更することが可能であり, 0.4 GeV から最大加速エネルギーの3 GeV を利用すること ができる.このエネルギー領域は,ADSにとって重要となる.

筆者らはこれまで GeV 陽子を用いて様々なニュートロ ニクスの研究を進めてきたが、本稿では弾き出し断面積と 核種生成断面積に焦点を当てて紹介する.

4.3.1 弾き出し断面積

ADSのビーム窓は常に大強度陽子ビームに晒されるた めに,窓の放射線損傷評価が重要となる.金属などの材料 が放射線に起因する損傷は,原子あたりの弾き出し数 (displacement per atom: dpa)により,入射粒子種やエネル ギーにかかわらず,照射後における材料特性をよく表され ることが知られている dpa は,弾き出し断面積を元に評価 されるが,弾き出し断面積の測定は ADS において重要な 数 GeV 領域で測定されておらず,また ADS のビーム窓は フェライト系耐熱鋼(T91)およびステンレス鋼 (SUS316L) などの鉄鋼製が候補となり,鉄の弾き出し断面積の実験 データが必要であるが,これまでの研究では鉄に対して 20 MeV 以上のエネルギー領域で実験データが存在しな かった. ADS開発に必要なエネルギー領域および材料に対 する実験データが全くなく,計算による損傷評価の妥当性 などの検証できなかった. ADSの開発において, GeV 領域 における弾き出し断面積の実験データの取得が課題であっ た. また J-PARC の既存施設においてビーム窓は既に用い られており, MLF, ニュートリノ実験施設,およびハドロ ン実験施設において,それぞれ Al 合金, Ti 合金,および Be 等の金属がビーム窓の材料として用いられているた め,様々な金属元素の評価が重要となる.

筆者らは鉄などの加速器構造材に用いられる元素の陽子 に対する弾き出し断面積を測定した[9,10]. 陽子ビーム を鉄などの金属試料に照射すると、原子の弾き出しによ り金属の格子中に損傷が生じる.この状態の金属では, Matthiessen 則に従い電子の流れが阻害され, 電気抵抗が 高くなる性質を持つ.弾き出し原子1個で起きる電気抵抗 変化は他の研究により20%程度の精度で既知のため、陽子 ビーム入射による電気抵抗変化から、弾き出された原子の 数を導出できる. さらに、その原子の数を試料に入射した 陽子強度(陽子束強度)で除することで,弾き出し断面積 を得ることができる.鉄などの金属試料に 0.4~30 GeV の エネルギーを有する陽子ビームを入射し、試料の電気抵抗 変化から弾き出し断面積を導出した. 試料の温度が極低温 でない場合には,熱運動により損傷が緩和し,実際の陽子 照射に伴う弾き出し断面積に起因する電気抵抗変化を正確 に測定できない問題があったため,試料を4K程度の極低 温に冷却し損傷の緩和を抑えた.極低温状態の金属は、電 気抵抗の温度依存がほとんど無くなるため、原子の弾き出 しによる微弱な電気抵抗変化の測定により可能となる. J-PARC の施設は、利用運転を継続させる必要があるため、 保守作業が頻繁に必要な冷凍機を用いることは不可能で あった. 冷凍技術の進歩によりメンテナンスフリーの小型 冷却機により実験が可能となった.極低温で熱伝導率が小 さい窒化アルミニウム製の絶縁体に試料を固定し(図6), 陽子ビーム入射に伴う抵抗変化を測定した. 試料は照射前 に融点付近まで昇温し、欠損がほとんど無い状態とした. 実験では、直径 0.25 mm の試料の中心に陽子ビームの位置 を合わせる高精度なビーム制御技術が必要であったが, J-PARC で培った陽子ビーム制御技術の活用により可能と した.本実験により鉄の弾き出し断面積を取得した、この データは ADS で用いられる陽子ビームのエネルギー領域



図6 陽子入射の弾き出し断面積測定の装置(真空チェンバ,冷 凍機および鉄試料).

における世界初のデータとなった.

取得した弾き出し断面積を計算モデルによる断面積と比 較した結果を図7に示す.弾き出し断面積は、低エネル ギー陽子の場合にはクーロン散乱による弾き出しが支配的 となり、エネルギーが高くなるにつれクーロン散乱の効果 は減少し、核破砕反応などの原子核反応による二次粒子生 成反応による効果が支配的となる.このため,弾き出し断 面積の評価には、クーロン散乱と原子核反応の適切な評価 手法が必要となる. PHITS コード[11]に原子の弾き出しモ デルを組込み[12],弾き出し断面積を計算した.まず,こ れまで一般的に用いられてきた NRT モデル[13]との比較 を行った. NRT モデルは考案者 (Norgett, Robinson およ び Torrens) の頭文字の略称となり, 計算値は10 MeV 以下 の陽子に対する実験値と比較的よい一致を示すことが知ら れていた.本実験データにおけるGeV領域のエネルギー範 囲では、計算値は実験値の2~3倍であり、これまでの NRT モデルによる dpa 評価には問題があることが明らか になった.

最新の分子動力学法に基づく評価では、弾き出された原 子は低温状態であっても 10 ps 程度の極めて短い時間にお いて、一定の割合で元の状態に戻る非熱的再結合(Athermal Recombination Correction: arc)の有用性が様々な研究 により示唆されている[14].そこで、arc モデルを PHITS コードに組み込み、弾き出し断面積を計算した.この結果、 arc モデルの計算値は本実験値および先行研究となる低エ ネルギー領域における実験の値[15]と良い一致を示した. 低エネルギー領域において、NRT モデルと arc モデルの違 いは少ないものの、エネルギーの増加とともに違いが顕著 となる.この理由は、弾き出される標的原子や二次粒子の エネルギーの増加に従い、非熱的再結合の効果が高くなる ためである.arc モデルの適用により高い精度で材料の損 傷評価が行えるようになった.

弾き出し断面積の測定により、ADSのビーム窓のみなら ず、J-PARC実験施設のビーム窓やMLFの水銀標的容器な ど高エネルギー加速器施設で使われる材料の損傷を精度良 く評価できるようになった.既にJ-PARCではメインリン グ(MR)を用いて同様な実験を行っており、これまで 0.4~30 GeVのAl, Ti, Fe, CuおよびWの弾き出し断面



図 7 鉄の陽子入射の弾き出し断面積の J-PARC および他の実験
 [15]と PHITS コードによる計算との比較.

積を取得した.世界の11機関で国際協力を進めている Ra-DIATE (Radiation Damage In Accelerator Target Environments) において本研究は着目されており,参加機関の米 国の Fermi National Laboratory や欧州原子核研究機構 (CERN)の協力の元,さらに高いエネルギー領域の弾き出 し断面積の測定により,440 GeV までの広いエネルギー範 囲における材料の損傷評価の研究を進める予定である.

4.3.2 核種生成断面積

JAEAの提案する ADSでは、LBEを標的および MA の冷却材として用いる.LBE 中には核反応により、水素か ら標的近傍にわたる様々な核種が生成するため、LBE 中に 生じる不純物の影響の評価が必要となる.LBE は高温で使 用するため、容易にガス中に移行する Xe や Po などの揮発 性の高い元素の生成評価が LBE の取扱いにおいて重要と なる.欧米の陽子加速器施設において核種生成断面積がこ れまで幾つかの測定例があるものの、実験データは十分で はなく、特に ADS で重要な数 GeV 領域のデータが不足し ていた.また、入射陽子数の測定は直接的に観測せずに AI 箔などの放射化法により導出されており、その測定精度も 十分とは考えにくい、J-PARC では、ピーク電流の高い大 強度陽子ビームを取り扱うための高精度なビーム強度モニ タを開発しているため、高精度のビーム強度を得ることが できる.

数GeV 陽子入射に伴う核種生成断面積の測定のため, 試 料駆動機構付きの真空チェンバを設置した.実験では, RCS で加速されたGeV 領域の陽子を試料に照射し, 照射後 に試料を取出しGe検出器で試料から放出されるγ線より放 射能を測定し, 試料の厚さや入射陽子の数で規格化し, 核 種生成断面積を導出した[16].標的には Be から Bc に至る 44種類の核種を用いシステマティックな断面積の測定を 行った.この一例として, 陽子入射により Bi 標的から²⁰⁶Po を生成する断面積を,入射陽子エネルギーの関数として 図8に示す.図では実験データの他に,核内カスケードと 統計崩壊の核計算モデルに,それぞれに INCL4.6 および GEM を用いた PHITS の計算と INCL++/ABLA07モデル [17]による計算との比較を示す.JAEA の核データセン ターが中心に作成した,評価済み核データライブラリ



図 8 Bi の陽子入射における²⁰⁶Po 生成断面積.本研究による実 験,他の実験および INCL4.6/GEM モデルを用いた PHITS コードとの計算の比較.

JENDL/HE-2007[18]との比較も示す.0.4 GeV 以下のエネ ルギー領域は、PHITS、INCL++/ABLA07および JENDL /HE-2007は実験と誤差内で一致する.一方、数GeV領域で は Michel 等[19]と Titarenko 等[20]のデータしかなく、こ れらに約2倍程度の開きがあった.本実験は Titarenko 等 の実験データを支持した.PHITS の計算は、概ね本実験結 果とよい一致を示し、JAEA が提案する ADS の 1.5 GeV 陽子の値は本実験結果と誤差内で一致した.筆者らは取得 した実験データにガウス過程回帰(Gaussian Process Regression: GPR)[21]を適用し、核データ評価も進めている. GPR は核種生成断面積のような、入射エネルギーの一変数 となる関数に対し有効であり、GPR によりデータの信頼性 も評価が可能となる.著者らの実験データの一部は、 ニュートロニクスの評価に用いられる最新の評価済み核 データライブラリ JENDL-5[22]にも反映された.

なお ADS における核変換を評価するのに重要な, MA の中性子核反応断面積の研究は, JAEA の基礎工学研究セ ンターのグループが MLF の中性子を用い,中性子核反応 測定装置 (ANNRI)[23]において精力的に進められてい る.既に Np, Am, Cm などの中性子入射の反応断面積の データを取得した[24].

以上のニュートロニクスに関する断面積データは、ADS の研究を進める上で重要なものとなり、ベルギーで進めて いる MYRRHA[25]との国際協力において積極的な情報交 換を進めている.

4.4 結言

ADS に向けた陽子取扱技術とニュートロニクスに関す る研究が着実に進められている.本章で紹介した技術開発 は,紙面の都合上で一部の物となる.本研究開発は,ADS のみならず,今度開発が予想される数十 MW の超大強度陽 子加速器施設においても重要な課題として位置付けられ る.

参 考 文 献

- [1] K. Tsujimoto et al., J. Nucl. Sci. Technol. 44, 483 (2007).
- [2] 核変換ディビジョン: J-PARC 核変換実験施設 技術設 計書 — ADS ターゲット試験施設(TEF-T)—, JAEA-Tech. 2017-003 (2017).
- [3] S. Sakamoto *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **562**, 638 (2006).
- [4] S. Meigo et al., Phys. Rev. Accel. Beams 23, 062802 (2020).
- [5] Technical design report second target station, ORNL/ TM-2015/24 (2015).
- [6] S. Meigo et al., J. Nucl. Mater. 450, 141 (2014).
- [7] 明午伸一郎 他: 第18回日本加速器学会年, 296-301 (2021).
- [8] C. Carlile *et al.*, European Spallation Source Technical Design Report (2013).
- [9] H. Matsuda et al., J. Nucl. Sci. Technol. 57, 1141 (2020).
- [10] 明午伸一郎, 岩元洋介, 松田洋樹: Isotope News, 774, 27 (2021).
- [11] T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684 (2018).
- [12] Y. Iwamoto et al., Nucl. Instrum. Methods B 274, 57 (2012).

- [13] M. Norgett et al., Nucl. Eng. Des. 33, 50 (1975).
- [14] K. Nordlund et al., Nat. Commun. 9, 1084 (2018).
- [15] P. Jung, J. Nucl. Mater. 117, 70 (1983).
- [16] H. Matsuda et al., EPJ Web Conf. 239, 06004 (2020).
- [17] S. Leray et al., J. Phys. Conf. Series 420, 012065 (2013).
- [18] Y. Watanabe, J. Korean Phys. Society 59, 1040 (2011).
- [19] R. Michel et al., J. Nucl. Sci. Technol. Suppl. 2, 242 (2002).
- [20] Y. Titarenko *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A 414, 73 (2012).
- [21] H. Iwamoto, J. Nucl. Sci. Technol. 58, 932 (2020).
- [22] https://wwwndc.jaea.go.jp/jendl/j5/j5_J.html
- [23] K. Kino et al., Nucl. Instrum. Methods A 626, 58 (2011).
- [24] A. Kimura et al., J. Nucl. Sci. Technol. 49, 708 (2012).
- [25] https://www.sckcen.be/en/projects/myrrha

●●● 小特集 J-PARC における加速器駆動核変換システム(ADS)の研究開発

5. ADS 用超伝導リニアックの研究開発

5. Research and Developments of a Superconducting Linac for ADS

近藤恭弘,武井早憲,YEE-RENDON Bruce,田村 潤 KONDO Yasuhiro, TAKEI Hayanori, YEE-RENDON Bruce and TAMURA Jun 日本原子力研究開発機構

(原稿受付:2022年1月20日)

ADSの要求を満たすドライバリニアックを実現するためには超伝導加速空洞が必須であり,従来常伝導を採 用していた低エネルギー部について,近年の特に低エネルギー用の超伝導加速空洞開発の進展を反映した再設計 を行った.また,最も使用実績の少ないスポーク型空洞について試作機による開発を行っている.本章では,こ れら日本原子力研究開発機構における最新の ADS 用リニアックの研究開発について報告する.

Keywords:

high-intensity linac, beam dynamics, space-charge effect, superconducting cavity, spoke cavity

5.1 はじめに

₹

加速器駆動システム(ADS)においてドライバ加速器は 最重要な構成要素である.**表1**に,日本原子力研究開発機 構(以下 JAEA)で計画している ADS 用線形加速器(リニ アック)の要求仕様を示す.

ADSを実現するためには、これまでに世界中のどこでも 実現されたことのない30 MWという大強度が要求される. このような大強度を得るために単純に電流値を増やすこと は空間電荷効果の増加よる種々の困難が伴うので、連続波 (CW)運転可能なリニアックを用いるのが世界的に標準で ある.CWリニアックには、粒子を加速する高周波 (RF)加速空洞として、その高い電力効率から超伝導空洞 が必須となる.また、大強度加速器においては、残留放射 線を特別な遠隔機構を用いない保守作業が可能な水準に抑 えるため、一般的にビーム損失を1 W/m程度以下にする必 要があるとされている.この観点においても、ビーム口径 を大きくとれる超伝導空洞が有利となる.さらに、許容さ れるビームトリップ頻度は、現在までに実現されている加

€1	JAEA ADS	リニア	ック	要求仕様
----	----------	-----	----	------

加速粒子	陽子	
ビームエネルギー	$1.5~{ m GeV}$	
ビーム電流	20 mA	
デューティーファクタ	100%(連続波, CW)	
ビーム出力	30 MW	
許容ビームトリップ頻度[1]		
10秒以下	20000回/年	
10秒~5分	2000回/年	
5分以上	42回/年	

Japan Atomic Energy Agency, Ibaraki 319-1195, Japan

速器による実績では達成されていない高い安定度であり, 常伝導空洞では実現困難であると考えられている.

日本原子力研究開発機構 (JAEA) では, その前身の日本 原子力研究所時代の1990年代, 中性子科学計画の一環とし て ADS 用リニアックの研究開発を進めていた[2].中性子 科学計画のリニアックは ADS リニアックのプロトタイプ という位置づけであったのでその設計ビーム電流は10 mA とされた.また,当時は低β(光速で規格化した粒子の速 度)用の超伝導空洞が開発されていなかったので, 100 MeV以下の低エネルギー部にはリニアックで通常使わ れる常伝導のドリフトチューブリニアック (DTL)を採用 していた.その後の超伝導空洞の著しい進展にともない, 低β空洞に関しても様々なタイプの加速空洞が開発され た.このような今般の研究開発状況を反映し ADS 用リニ アックの設計見直しを行った[3].図1に JAEA ADS リニ アックの構成を示す.

見直し後の設計では、ビーム電流は ADS 用として正規 の要求電流である 20 mA とした.また、初段の加速構造で ある高周波四重極リニアック (RFQ) には、いまだ超伝導 RFQ が実用化されていないことからここのみ常伝導を採 用している.それ以外の加速空洞は、粒子の速度に応じて 図2に示すような、半波長共振型 (HWR)、シングルス ポーク、楕円空洞の3つのタイプの超伝導空洞を用いてお り、スポーク空洞と楕円空洞については、異なるβに最適 化された2種類の空洞をそれぞれ用いている.以前の設計 でのDTLが超伝導空洞であるHWRとスポーク空洞に置き 換えられた.また、楕円空洞も以前の設計で8種類のβ 型であったのを2種類に整理した.これは多数の異なる種 類の空洞を開発・生産することによるコスト増を抑えると

coresponding author's e-mail: yasuhiro.kondo@j-parc.jp





ともに,許容トリップ回数の供給を満たすために,運転時 にトリップした空洞を周りの空洞の電圧を即座に調整する ことで補償しビーム停止時間を短縮する運転方法(フォー ルトリカバリ)への親和性を高める目的もある.

本章では、このJAEA ADSリニアックの開発状況について述べる.

5.2 ADS リニアック許容トリップ頻度の評価

表1に示されるビームトリップ頻度の許容値は、ビーム トリップにより未臨界炉の出力が低下し、熱サイクル疲労 で未臨界炉の構成機器が損傷しないようにすることから評 価した[1].特に、ビームトリップ時間が5分を超えるよ うなビームトリップは発電系までも含めて ADS プラント の再起動が必要となり、プラント稼働率が極端に悪くなる おそれがある. そこで, ADS プラントの年間稼働率を70% と仮定すると年間42回となった.また,ADSリニアックで 生じるビームトリップを減らす方法を検討するため、年間 ビームトリップ回数の許容値と J-PARC リニアック(ビー ムエネルギー400 MeV, 常伝導加速器, パルスモード運転) の運転データから推測した ADS リニアックの年間ビーム トリップ回数を比較した.図3は、J-PARC リニアックの 4年分の運転データから推測した ADS リニアックの年間 ビームトリップ回数をビームトリップ時間の関数としてヒ ストグラムで表したものである. 図中の実線は年間ビーム トリップ回数の許容値を表している. ヒストグラムと実線 を比較すると、ビームトリップ時間が10秒以下の年間ビー ムトリップ回数は許容値以下となるが、他方、ビームト リップ時間が10秒を超える年間ビームトリップ回数は許容



図3 J-PARC リニアック実績からの ADS リニアックビームト リップ推定値.

値を1.1~5.4 倍上回っていることがわかる.このように, ADSリニアックとの運転条件や,超伝導・常伝導の違いは あるものの,J-PARCリニアックの実績値からの推定では ADSの要求を満たせないと結論付けられる.現在米国オー クリッジ国立研究所の協力を得て,超伝導部を有する大強 度陽子リニアックでは唯一利用運転中である核破砕中性子 源(SNS)リニアックのトリップ頻度の解析を行っている.

5.3 JAEA ADS リニアックのビーム力学設計

ADS 用に限らずリニアックにおいて加速空洞の運転周 波数の選択は非常に重要である. JAEA ADSのような大電 流リニアックでは空間電荷効果(ビームバンチ内での粒子 間に働くクーロン力による発散効果)の制御が重要であ る.一般的に空間電荷効果は同じビーム電流なら周波数が 高いほど小さくなる.これは単純に周波数が高い方が1バ ンチ当たりの電荷数が小さくなるからである.一方でRFQ はその構造上,周波数が高いと要求される電極間電圧が大 きくなる.前章で述べたように、ADS用リニアックには極 めて高い安定性が要求されるが、電流値は J-PARC リニ アックの 50 mA に比べれば小さい.また, J-PARC RFQ は最大デューティーファクタ3%のパルス運転がされるの に対し、ADSではCWであり、安定性への条件が格段に厳 しいことから、初段の周波数を J-PARC リニアックの 324 MHz よりも下げるのが妥当と判断した. β が大きくな ると1加速セルの大きさが大きくなり過ぎて非効率なの で. 適切なエネルギーまで達したら周波数を上げていく. 我々のリニアックの場合,初段の162 MHzから,スポーク 空洞で 324 MHz, 楕円空洞で 648 MHz とする.

空間電荷効果によって広がるビームがビームダクトに当 たって損失するのを防ぐためには、横(ビームと垂直)方 向の収束力を強める必要がある.以前の設計の ADS リニ アックや、J-PARC リニアックでも採用している DTL はこ の面で極めて優れた加速構造であり、全ての加速ギャップ の間に収束磁石を配置することで、非常に高い収束密度を 実現している. 超伝導空洞では構造上ここまでの収束密度 は不可能であり、より大電流の常伝導リニアックと同様, またはそれ以上に慎重な設計が必要である.空間電荷が無 い場合の加速器のビーム力学は、横方向と縦方向(ビーム 方向) は独立なものとして計算されるが, 両者が空間電荷 力によって結合するのが大電流加速器のビーム物理の大き な特徴である.そのため、縦横の収束力をバランス良く調 整していく設計を用いる.これは、内部エネルギーである エミッタンス¹と外部エネルギーである収束力の積を縦横 等しくなるように調整するため、等分配法と呼ばれる.現 代の大電流リニアックで広く採用されている等分配法を ADS リニアックでも採用している.

空洞の種類が変化する位置においては加速器の設計パラ メータが変化する.パラメータの急激な変化は,エミッタ ンス増大の原因となり,ビームロスを誘引する.また, ビーム電流が変化する場合,空間電荷力が変化することで ビーム光学系が変化してしまう(ビーム電流依存性).こ のようなことを避けるため,現代のリニアック設計では 諸々のパラメータをできるだけ"なめらかに"変化させる ことを要求する.周波数の変わり目では縦方向のアクセプ タンスが急激に小さくなる.これを避けるため,図4に示 すように,同期位相と呼ばれる,ビームバンチをRF電界の どの位相に乗せるかを示すパラメータの絶対値を小さくす る.縦アクセプタンスは同期位相に比例するため,周波数 と同期位相の積が一定になるようにする.また,空洞の種



図4 同期位相の変化.横軸はビーム方向の座標,点線は周波数 が変化する位置を表す.

類ごとに収束電磁石の構成が異なるのと,空間電荷効果が 粒子のβが大きくなるにしたがって小さくなることか ら,図5に示すように,横方向の収束力もそれに応じてな めらかに小さくしていく.

実際の設計は GenLinWin および TraceWin[4]を用いて 行った.加速空洞の電力や同期位相などの縦方向設計は GenLinWin によって設定され,収束電磁石のパラメータ (横方向設定)は TraceWin によって行われる.このツール セットにはこれまで述べたような設計手法がすべて実装さ れ設計をサポートしてくれるが,パラメータの初期値や, 各区間での上限値などを設定し,目的の設計が得られるよ うにするのは設計者の手腕である.**表2**にこれまで述べた リニアック設計によって得られた結果(各空洞のパラメー タ)をまとめる.幾何学的 β は,空洞寸法を決めた時の設 計 β である.加速電界 E_{acc} もビーム力学設計により z 方向 に変化するが,表中の値はその最大値である.

設計が得られたら、粒子シミュレーションによってビー ムロスが要求値である1W/mを十分に下回るかを確認す る.このシミュレーションはTraceWinを用いて行う.ま ずは理想的な状態で、ビームエンベロープがビームパイプ に対して十分な余裕があることを確認する.実際の加速器 の運転では、電磁石や加速空洞の設置誤差や設定値の誤差



1 ビームの質を表す指標. 粒子の位置と運動量の位相空間内でのビームが占める面積を示す.

表2 JAEA ADS リニアックの設計結果.

	HWR	スポーク1	スポーク 2	楕円1	楕円 2
周波数(MHz)	162	32	24	6	48
幾何学的 β	0.08	0.16	0.43	0.68	0.89
セル数	2	2	2		5
ビーム口径 (mm)	40	40	80	94	
最大加速電界 Eacc(MV/m)	7.12	6.60	8.45	13.8	14.2
空洞数	25	66	72	60	70

など,理想状態からの様々な誤差がある.これらの誤差を 考慮したシミュレーションは、誤差をランダムに発生させ た1000通りのリニアックを生成し、それぞれのシミュレー ションで得られる結果を統計的に評価することで行う.実 際の設計過程ではこの段階でビーム損失が多いなどの問題 があった場合、設計にもどってボトルネックを解消する努 力を行い、再び粒子シミュレーションで確認するといった イテレーションを行う.図6にこのシミュレーションの結 果を示す.理想的な状態から誤差を入れると、主に電磁石 の整列誤差の影響でビーム幅が広がる.ただし整列誤差は 静的なものであり、運転時の起動補正で修正できる. これ を考慮すると、理想状態からそれほど大きく変わらない状 態になる.結果,誤差を考慮してもビームロスが1W/m 以下となることが確認され、JAEA ADS リニアックのリ ファレンス設計が完成した.本項では限られた紙面の都合 上,設計の全容について述べることはできないが、このリ ファレンス設計には現代のリニアック設計思想が全て詰め 込まれており, 我々の ADS リニアックとしてのみならず, 現代の大電流超伝導陽子リニアックの良いリファレンス設 計となっていると自負している.興味のある方はぜひ文献 [3]を参照していただきたい.

5.4 スポーク空洞の開発

これまでに述べたように、超伝導空洞は ADS リニアッ クの性能を決する最も重要な構成要素である. ADS リニ アックで用いられる3種類の超伝導空洞のうち、わが国に おいても、HWR は国際核融合照射施設の実証機で用いら れる予定であり、量子科学技術研究開発機構六ケ所研究所 との研究協定に基づき適宜情報交換を行っている.また、 楕円空洞は素粒子実験用の空洞で多くの実績がある.しか しながらスポーク空洞については、国内では実績はもちろ



ん、将来計画も我々の計画以外にはなく、国際的にもいま だ利用運転用の加速器における供されている実績がない. そこで JAEA において、試作スポーク空洞を製作し、製作 方法の確立、性能評価を行うこととした. JAEA でも国内 でもスポーク空洞の製作実績がないので、空洞長が小さく 製作が容易と思われ、また試作コストも小さい低 β 側の $\beta = 0.2$ であるスポーク1の試作を行うこととした.**表2**の スポーク1の β と異なるのは、試作機の仕様策定後にさら にリニアック設計の最適化を進めたためである.いずれに せよこの程度の β の差異に本質的違いはない.**表3**に試作 スポーク空洞の仕様を示す.

スポーク空洞は2ギャップ空洞であり、ギャップ間距離 は幾何学的 β (β_g) と RF 波長 λ から、 $\beta_g\lambda/2 = 87$ mm に決 まる. ビームパイプも含めて長手方向の空洞長は 300 mm とし、口径はビーム力学設計の要求から 40 mm である. そ の他の空洞パラメータは有限要素法電磁場計算パッケージ の CST [5] を用いて得た[6,7].

空洞の性能を示す重要な指標に通過時間係数Tがある. RF加速では時間変動する電場で加速するが、時間変動しない加速電圧 (z方向加速電界 E_z のz方向積分値) との比をとることで、加速効率を表す. すなわち、

$$T(\beta) = \frac{\int E_z(z) \sin\left(\frac{2\pi}{\beta\lambda}z\right) dz}{\int |E_z(z)| dz},$$
(1)

と定義される. *T* は粒子の速度 β に依存するので, できる だけ広い β 範囲での高い*T* が良い空洞の指標となる. **図7** に β の関数としての*T* を示す. $\beta = 0.24$ のときに*T* は最大 値 0.81 をとる. 有効長 L_{eff} は, *T* 最大の時の β (β_{opt}) と λ の積として定義される.

超伝導空洞の場合,空洞の無負荷Q値が表面状態に大き

表3 試作スポーク空洞仕様.

周波数	324 MHz
幾何学的 β βg	0.188
最適 β β _{opt}	0.24
ビーム口径	40 mm
空洞径	500 mm
空洞長	300 mm
有効長 $L_{\text{eff}} = \beta_{\text{opt}} \lambda$	222 mm
幾何学係数 $G = Q_0 R_s$	$90 \ \Omega$
通過時間係数 T	0.81
シャントインピーダンス/無負荷 Q 値 $R_{ m sh}/Q_0$	$240 \ \Omega$
最大電界/加速電界 $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$	4.1
最大磁場/加速電界 Bpeak/Eacc	7.1 mT/(MV/m)



く依存するので,表面状態に依存しない空洞自体の性能を 示すパラメータを用いたい.幾何学係数Gは, Q_0 に表面抵 抗 R_s を乗じて,空洞の幾何学形状のみを反映したパラメー タとして扱うためのものである.シャントインピーダンス R_{sh} は通常空洞の蓄積エネルギーのうち加速に使われる電 圧がどの程度かを示すパラメータであるが, Q_0 で割ってい るのは,同様に表面抵抗依存性を無くし空洞自体のパラ メータとしたいからである.最大電界と最大磁場の加速電 界に対する比は,ビーム力学で要求される加速電界 E_{acc} をとったときに最大電界 E_{peak} と最大磁場 B_{peak} が超伝導を 維持する限界を下回るか確認するためのパラメータであ る.ADS リニアックでは高い安定性が要求されるため, E_{peak} と B_{neak} は十分に保守的な値になるように設定してある.

電磁場設計が完了したら試作空洞の製作に入る.スポー ク空洞はプレス成型した部品を電子ビーム溶接(EBW)で 接合して構成する.図8に試作スポーク空洞の部品分割を 示す.この原稿執筆時点で各部品のプレス成型および切削 加工は終了しており,EBWによる組み立て工程に入って いる.EBWでは,各接合箇所で電子ビーム電流や収束など の最適な溶接条件が異なる.さらに,最終溶接個所のよう に,真空外面からビームを撃たなければならない場合,真 空内面になめらかな貫通ビードを形成させねばならず(裏 波溶接),高度な技術が要求される.このため,溶接個所ご とに,実際の溶接部品を模したテストピースを用いた試験 溶接を実施している.図9に,実際にEBW接合したスポー ク部品を示す.今後,引き続き溶接工程を続け,組立完了 後,熱処理や化学研磨といった表面処理を行い,液体へリ ウム温度まで冷却しての性能測定を行う.

5.5 まとめ

JAEAにおいて、ADS用リニアックの基礎開発を行って いる.リニアックのビーム力学設計については、低エネル ギー部まで超伝導化したリファレンス設計を完成した.超 伝導加速空洞開発においては、試作スポーク空洞を製作



図8 試作スポーク空洞部品分割.



図 9 EBW により接合されたスポーク部品.

し、実証開発中である. 今後はより実際的な運転条件や、 フォールトリカバリ運転時におけるリニアックの各種挙動 のシミュレーションによる解析研究,および試作スポーク 空洞の性能測定を行い, ADSリニアック実現に向けた基礎 研究を一層推進する予定である.

参 考 文 献

- [1] H. Takei et al., J. Nucl. Sci. Technol. 49, 384 (2012).
- [2] M. Mizumoto *et al.*, Proc. 19th International Linear Accelerator Conference, p. 349 (1998).
- [3] B. Yee-Rendon *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **24**, 120101 (2021).
- [4] D. Uriot and N. Pichoff, CEA Saclay (CEA/SACLAY-DRF/Irfu/DACM) (2020).
- [5] CST STUDIO SUITE, https://www.3ds.com/ja/
- [6] J. Tamura *et al.*, Proc. 19th International Conference on RF Superconductivity, p.399 (2019).
- [7] J. Tamura et al., JPS Conf. Proc. 33, 011049 (2021).

ज∕∽ज∽∽ 小特集執筆者紹介



前川藤夫

日本原子力研究開発機構 J-PARCセンター 核 変換ディビジョン長.大阪大学大学院・博士 (工学).1990年日本原子力研究所入所,10年 間の核融合中性子工学研究の後,J-PARC物

質・生命科学実験施設の1 MW 核破砕中性子源建設に従 事,2014年より J-PARC 核変換実験施設建設に向けて格闘 中.趣味は山登り、トレイルランニング、ガーデニング.自転 車通勤も相まって日焼けがち.



武井旱憲

日本原子力研究開発機構 J-PARC センター核 変換ディビジョン 研究主幹. 1992年新潟大学 大学院自然科学研究科・博士(理学).大電流 電子線加速器開発に従事した後,加速器駆動

核変換システム用陽子加速器のビームトリップ頻度評価,核 変換実験施設におけるレーザー荷電変換技術の開発に従事. 大学院生の時に行った岐阜県が忘れられず,頻繁に高山市に 通い,美味しい珈琲を堪能することが趣味.



佐々敏信

日本原子力研究開発機構, J-PARC センター核 変換ディビジョン・研究主幹, 博士 (原子核工 学). 高温ガス炉臨界実験装置を用いた実験研 究を経て, 鉛ビスマスを用いた加速器駆動核

変換システムおよび核破砕ターゲットの設計研究に従事、大型の試験装置を用いた液体金属の実用化研究を進めていたところ、2022年4月より福井県に建設予定の新試験研究炉の開発に参画することに、趣味の旅行や海岸をドライブする機会が減ることを危惧している.



明午伸一郎

略歴:1992年日本原子力研究所入所 現在に至 る.所属:J-PARC センター 日本原子力研究 開発機構 研究主席.専門:原子核物理,ビー ム・加速器物理,材料損傷評価.趣味:クラ

シックピアノ演奏,ビームいじり,犬・猫の調教,阪神タイガースの応援.



中野敬太

日本原子力研究開発機構 J-PARCセンター 核 変換ディビジョン 研究員. 2020年に九州大学 大学院総合理工学府を修了,博士(工学).専 門は核データと放射線計測で,J-PARCで計画

中の新実験施設の建設に向けた核 データ測定を行っていま す.最近ペットを飼おうかと検討中です.



いわ もと ひろ き 岩 元 大 樹

日本原子力研究開発機構 核変換システム開発 グループ 研究副主幹 (J-PARC センター 核変 換ディビジョン 兼務). 2010年九州大学大学 院修了・博士 (工学). 核変換に関する原子核

物理,原子炉物理,放射線遮蔽,核データ評価が主な研究分野 です.趣味で始めた機械学習が今では研究テーマの一つにな りました.3人の息子(10歳,6歳,2歳)の育児に日々奮闘 しています.



近藤恭弘

日本原子力研究開発機構 J-PARCセンター 主 任研究員.2000年より J-PARC リニアックの初 段加速器の開発を開始し、今にいたります.も ともと常伝導加速器から始めたのですが、

ADS 開発で超伝導もやりはじめ,最近では、ミューオン加速 や重イオンにも手を広げており,あらゆる種類の加速空洞を 極めるのが野望です.趣味はサーキット走行とバックカント リースキー.



YEE-RENDON Bruce

Japan Atomic Energy Agency. Senior postdoctoral fellow. In 2014, I received the doctoral degree in physics from the Centro de Investigacion de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del

IPN, Mexico City, Mexico. I developed my doctoral thesis in Crab Cavities studies for the High Luminosity Large Hadron Collider at the European Organization for Nuclear Research (CERN), Geneva, Switzerland. In 2015, I joined the Japan Proton Accelerator Research Center (J-PARC) first as a postdoctoral fellow from de High Energy Accelerator Organization (KEK) and in 2018 as a senior postdoctoral fellow from the JAEA. My research interest includes beam optics, Superconducting Radio-Frequency, and beam-beam effects, among others. Currently, I am working on the physics design of a 30 MW superconducting proton linac for the accelerator-driven subcritical system of JAEA. I enjoy running races and cooking BBQs.



田村 潤

日本原子力研究開発機構 J-PARCセンター 研 究員. 2010年 東京工業大学大学院総合理工学 研究科 博士(理学). J-PARCリニアックにて, ビームエネルギーの増強, ビームロスの低減

を主な研究テーマとして活動してきました.最近は,ADS用 超伝導スポーク空洞の開発にも取り組んでいます.どうぞよ ろしくお願いいたします.