

国際シンポジウム開催報告

「加速器駆動核変換システムとアジア ADS ネットワークの構築」

原研 大強度陽子加速器施設開発センター

大井川 宏之

oigawa@omega.tokai.jaeri.go.jp

1. はじめに

加速器駆動核変換システム (ADS) は、図 1 に示すように、強力な加速器中性子源を用いて、未臨界体系での核分裂連鎖反応を維持する装置である。ADS は、高レベル廃棄物に含まれるマイナーアクチニド (MA) などの長寿命放射性核種の核変換に有効であると考えられているため、各国で研究開発が進められている。ADS は、大強度陽子加速器、核破砕ターゲット及び未臨界状態の原子炉の 3 要素が結合した複合システムであり、その開発には、加速器物理、原子核物理、原子力工学、材料科学などの非常に多岐にわたる分野での協力が必要となる。また、その実現にはこれまでの原子炉にはなかった技術課題を克服する必要がある、国際的な協力の下に研究開発を進める必要がある。ADS は原子力利用に伴う廃棄物の低減化を狙ったシステムであるため、多くの国が興味を持っており、欧州を中心に国際協力・分野間協力が活発に行われている。

日本では、日本原子力研究所 (原研) が中心に、1980 年代後半から ADS の研究開発を

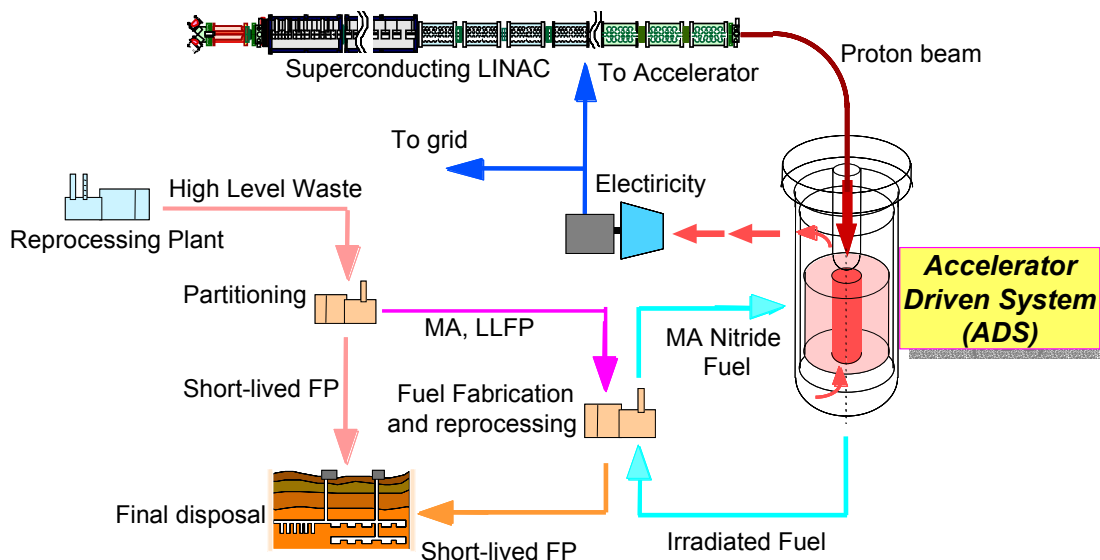


図 1 加速器駆動核変換システム (ADS) の概念

進めてきたが、近年、大学でも ADS への関心が高まってきており、国内での様々な取り組みが開始されつつある。また、原子核物理と原子力工学の研究者が分野の垣根を越えて交流を始めていることは、これまでにない新たな動きとして特筆できる。しかし、ADS の研究開発に関する国際協力・分野間協力はまだ十分ではなく、特に ADS の基礎的な研究開発を始めた韓国及び中国を含んだアジア地域での交流は現在のところほとんどなされていない。

本シンポジウムは、米国、欧州、日本、韓国、中国での ADS の研究開発状況と将来計画を相互に理解し、今後の国際協力と分野間協力の活性化を図ることを目的に、平成 15 年 3 月 24、25 日に東京で開催したものである。プログラムを図 2 に示す。なお、本シンポジウムにはイタリア新技術・エネルギー・環境研究所 (ENEA) の理事長であり、エナジー・アンプリファイアーとしての加速器駆動システムの提唱者でもある Carlo Rubbia 博士 (1984 年ノーベル物理学賞受賞) が出席予定であったが、残念ながら急用のために来日できなくなったそうである。

シンポジウムでは、齋藤伸三・原研理事長による開会あいさつに引き続き、1 日目から 2 日目午前にかけて各国での ADS 開発に関する講演が行われた。

International Symposium on
Accelerator- Driven Transmutation System and Asia ADS Network Initiative

Date : March 24-25, 2003
Place : GAKUSHI-KAIKAN, Tokyo, Japan

Program:

<p>March 24 (13:00 - 17:40)</p> <p>Opening Remarks</p> <p>1. Activities in USA</p> <p>2. Activities in Europe</p> <p>3. Current Status and Future Perspectives for ADS Development in Japan</p> <p>4. Fuel Cycle R&D Activities in Korea</p> <p>5. Activities in China</p> <p>6. Experimental Program at Kyoto University</p>	<p>S. Saito (President, JAERI)</p> <p>B. Richter (Former President, SLAC)</p> <p>B. Frois (French Ministry of Research)</p> <p>H. Oigawa (JAERI)</p> <p>H. S. Park (Vice President, KAERI)</p> <p>Z. Zhao (President, CIAE)</p> <p>S. Shiroya (Kyoto Univ.)</p>
<p>March 25 (9:30 - 16:00)</p> <p>7. High-Intensity Proton Accelerator Project: J-PARC</p> <p>8. Accelerator for ADS</p> <p>9. ADS Design and Experimental Study in Korea</p> <p>10. The neutron multiplication experiment for ADS reactor physics study in China</p> <p>11. Nuclear Data in Japan</p> <p>12. Discussion : Future Plan and International Collaboration for ADS</p> <p>12.1 Keynote Talk -1 : Nuclear Physics and Transmutation Technology</p> <p>12.2 Keynote Talk -2 : Technical Issues for ADS</p> <p>12.3 Keynote Talk -3 : The status of nuclear power planning in Vietnam and a view on Asia ADS Network</p> <p>12.4 Keynote Talk -4 : Asia ADS Network Initiative</p> <p>12.5 Free Discussion</p> <p>Closing Remarks</p>	<p>S. Nagamiya (KEK/JAERI)</p> <p>Y. Mori (KEK)</p> <p>T. Y. Song (KAERI)</p> <p>H. Xia (CIAE)</p> <p>M. Igashira (TITech)</p> <p>A. Mengoni (CERN)</p> <p>H. Oigawa (JAERI)</p> <p>V. V. Thuan (INST, Vietnam)</p> <p>Y. Nagai (Osaka Univ.)</p> <p>S. Shiroya (Kyoto Univ.)</p>

図 2 プログラム

2. 米国の状況

米国の状況については、「先進核燃料サイクル計画（Advanced Fuel Cycle Initiative : AFCI）」の評価委員会で座長を務める Barton Richter 氏から説明があった。なお Richter 氏は、スタンフォード大学線形加速器研究センター（SLAC）の前所長で、1976年にJ/Ψ粒子の発見でノーベル物理学賞を受賞されている。

米国での分離変換技術への取り組みは、現在のワンス・スルー政策に対して、①廃棄物の毒性低減、②核不拡散、③処分場コスト低減、④経済性と社会受容性向上の4つの観点から検討されている。今のままではヤッカマウンテン処分場で受け入れることのできる使用済み燃料は概ね2015年頃の発電分までであり、分離変換技術を取り入れることによって、廃棄物容量は約1/4とできるため、ヤッカマウンテン処分場3個分の節約が期待できるとしている。また、0.1%の漏洩率が達成できれば、廃棄物の隔離期間を30万年から400年に短縮できると見込んでいる。

米国での核変換の対象の大半はプルトニウムであり、以前のATW概念（Accelerator Transmutation of Waste）では、プルトニウムとMAを全て加速器駆動システムで核変換することを考えていた。一方、現在のAFCIの概念では、熱中性子システム（例えば軽水炉）でプルトニウムを多重リサイクルし、残ったプルトニウムとMAを高速中性子システムで核変換することを狙っている。高速中性子システムとしては、GENERATION-IVの取り組みにおけるガス冷却高速炉、液体重金属高速炉等と、ADSが候補である。プルトニウムを多重サイクルする部分を「シリーズ1」、燃え残りの「灰」を核変換する部分を「シリーズ2」と呼んでいる。

Richter氏によれば、ADSに関する技術課題としては、大強度陽子加速器の実現性自体は大きな問題ではなく、加速器信頼性、ビームロス、未臨界炉心との結合、アクチニドの断面積、材料などが研究開発されるべきであり、J-PARCでの取り組みが国際協力の下に進められることに期待しているとのことであった。

米国でのワンス・スルー政策が変更されるのかとの質問に対して、多くのマイルストーンをクリアした後に議論すべきであり、今すぐの政策転換は考えにくいとのことであった。

3. 欧州の状況

欧州では、多くの国が参加して多様な取り組みが展開されている。これらを俯瞰する講演が、フランス研究省技術局エネルギー・輸送・環境・天然資源部長のBarnard Frois氏からなされた。欧州での分離変換技術への取り組みは、明確な戦略に基づき、多くの個別プロジェクトで構成されるIP-ADOPT（Integrated Project on Advanced Options for Partitioning and Transmutation）プロジェクトとして欧州委員会が統括している。参加する国は、フランス、ドイツ、ベルギー、イタリア、スイス、スペイン、他5カ国である。この内ADSについては、断面積測定、臨界実験等の基礎試験から、高出力核破砕ターゲ

ット実証試験や実験炉級 ADS の設計研究等の工学的実証レベルまで、幅広い取り組みがなされている。

MEGAPIE プログラムは、スイスのポール・シェラー研究所において、 $1.74\text{mA} \times 575\text{MeV}$ (1MW) の陽子ビームによって鉛ビスマス核破砕ターゲットを照射し、技術成立性の実証を目指したものである。欧州勢に加え、日本（原研）、韓国、米国も参加している。

TRADE 計画は、イタリアのトリガ型研究炉を陽子サイクロトロンと結合する試みであり、フランス、ドイツ、米国が参加する。トリガ炉はプール型軽水冷却炉で熱出力 1MW、導入する陽子は約 120MeV で、電流は $0.5 \sim 1\text{mA}$ 程度である。2007 年の実験開始を予定している。

MYRRHA 計画は、 $350\text{MeV} \times 5\text{mA}$ (1.75MW) の陽子を 100MW 級の高速中性子未臨界体系と結合する本格的な ADS 実証を狙ったもので、ベルギーの計画である。燃料には MOX を用いる。MYRRHA 計画の特徴として、陽子ビームと鉛ビスマス核破砕ターゲットを隔てるビーム窓を設けない「窓なしターゲット」概念（図 3 参照）を導入している点が挙げられる。

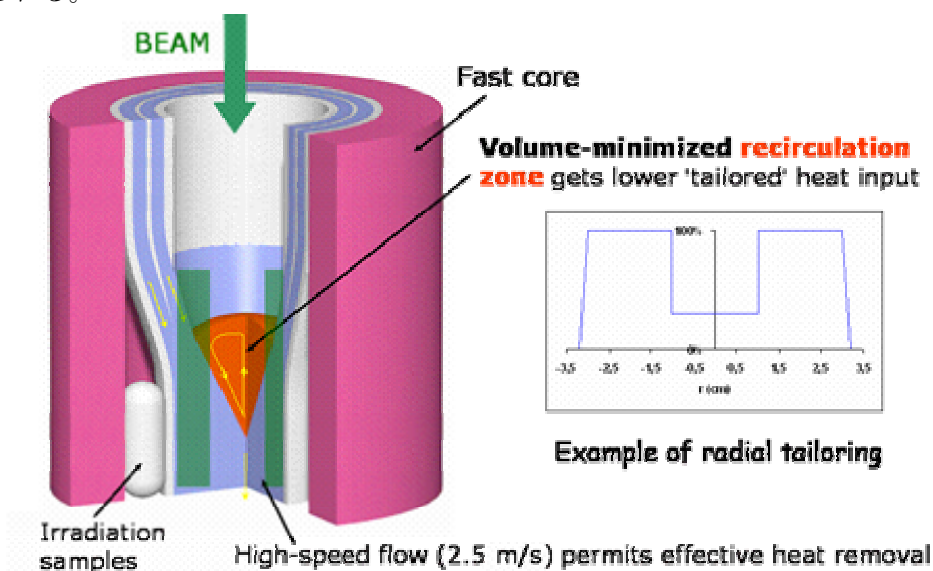


図 3 ベルギー-MYRRHA 計画の窓なしターゲット概念

4. 日本の状況

筆者が、日本における ADS 開発の現状と将来計画について講演を行った。まず、日本における分離変換技術の位置づけとして、2000 年に原子力委員会が行ったオメガ計画（群分離・消滅処理技術研究開発長期計画）のチェック・アンド・レビューについて説明した。分離変換技術は、高レベル放射性廃棄物の処分に係る負担低減や資源としての有効利用に資するものとなる可能性があり、今後を着実に研究開発を進めることが適当であるとの評価がなされている。特に、分離変換研究に携わる機関は、国内外の研究機関との協力を重視すべきであることが示されている。

原研が進める分離変換技術の概念は、再処理工場から排出される高レベル廃棄物を群分離し、長期にわたって高い毒性を保持し続ける MA の大部分を核変換専用システムで「焼却」、即ち核分裂反応で短半減期か安定な核種に変換しようとするものである。核変換専用システムでは、燃料中の MA 濃度を可能な限り上げることが望ましいが、このような体系を臨界状態で運転するのは困難であり、加速器中性子源で連鎖反応を維持する必要がある。これが ADS を核変換システムとして用いる理由である。ADS では核分裂反応で生じる熱を使って発電し、加速器の運転に給電する。余った電力があれば、売電することも可能である。

原研が提唱する ADS は、熱出力 800MWth の鉛ビスマス冷却・タンク型プラントで、1 年で電気出力 1000MW の軽水炉約 10 基・年で生じる MA の核変換が可能である。体系の実効増倍率は 0.95 以下とし、加速器出力は 22~30MW 程度が必要となる。

原研では、ADS の技術開発を目的として、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と共同で進める大強度陽子加速器計画 (愛称: J-PARC) において「核変換実験施設」(図 4) の建設を計画している。核変換実験施設は、低出力 (600MeV、10W) の陽子ビームを臨界実験装置に導入できるようにする「核変換実験施設 (TEF-P)」と、高出力 (600MeV・200kW) の陽子ビームで核破碎ターゲットの技術開発を行う「ADS ターゲット試験施設 (TEF-T)」からなる複合施設である。核変換物理実験施設では、高速中性子未臨界体系と核破碎中性子源を組み合わせた炉物理実験、陽子ビーム出力を調整することによる ADS の運転制御性検証実験、パルス状陽子ビームを利用した断面積測定等、多様な実験を行う。一方、ADS ターゲット試験施設では、陽子ビーム窓候補材料の照射効果データの取得、照射環境下での鉛ビスマス核破碎ターゲットによる材料腐食特性の研究、液体ターゲットシステムの技術蓄積等、これまでの原子力工学にはない新たな技術課題の研究開発を行う。核変換実験施設は全体プロジェクトの中で第 2 期として位置づけられて

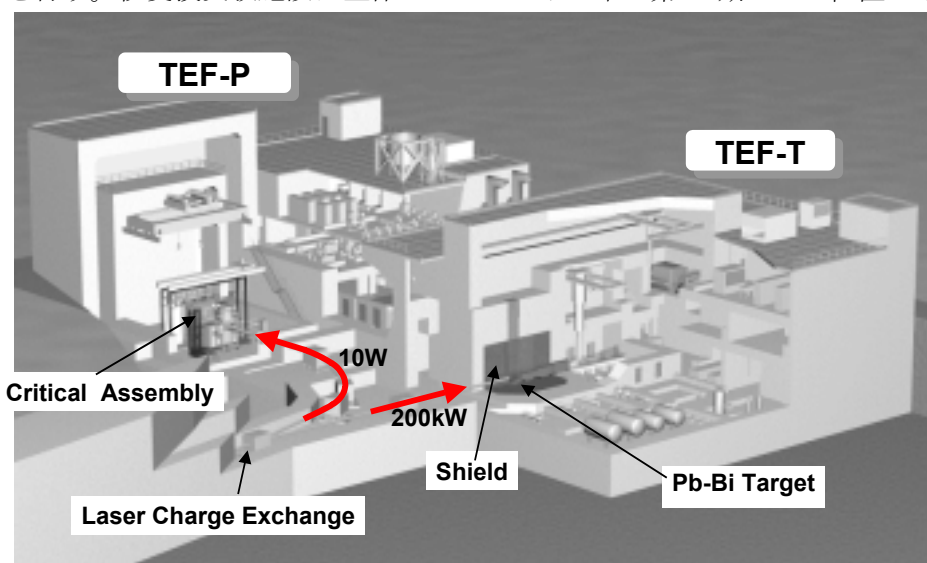


図 4 大強度陽子加速器計画 J-PARC で原研が提案する「核変換実験施設」の概念図

おり、2006年からの建設を予定している。

その他、原研で現在行っている研究開発としては、超伝導線形加速器の開発、鉛ビスマス共晶合金による材料腐食データの取得、未臨界炉物理実験、核データ整備、ADSの設計研究などがある。また、ADS用燃料としてMA窒化物燃料に関する研究開発を並行して進めている。

原研の他に、京都大学、東北大学、東京工業大学、名古屋大学などでもADSに関する取り組みがなされており、断面積測定や鉛ビスマス技術に関する研究開発も国内で盛んになってきている。

今後の展開に関しては、ADSを中心とした分離変換技術の工学的実証を目指した「実験炉級ADS」の建設を提案していく。実験炉級ADSは、熱出力80MW、陽子加速器出力2MW程度であり、建設当初はMOX燃料用い、徐々にMA窒化物燃料を装荷する。地層処分場の建設が2030～40年頃とすれば、実験炉級ADSを2020年ぐらいまでに建設し、2030年を目途にMAの核変換の実証する必要がある。このような実験炉級ADSの設計データとなる貴重な知見を与えるのが前述の核変換実験施設である。

5. 韓国の状況

韓国における核燃料サイクルの研究開発活動について、韓国原子力研究所（KAERI）の副理事長であるHyun Soo Park氏が講演した。

韓国でのエネルギー消費は、この20年で約4倍になっており、エネルギー資源の98%を海外に頼っている状況である。原子力発電は、資源が分散していることやエネルギー市場の動向に燃料価格が左右されにくいことから、韓国のエネルギー戦略上重要な位置づけであり、現在までに18基のPWR及びCANDU炉が導入され、総発電量に占める原子力の割合は1998年には42%となった。さらに2基のPWRが建設中であり、2015年までに8基が建設される予定である。

一方、使用済み燃料の取り扱いについては確固とした方針が定まっておらず、多くのサイトで2010年までに使用済み燃料の貯蔵容量が満杯になってしまう。このような観点で、KAERIでは、使用済み燃料処理・処分に関する多様な研究開発を「核拡散抵抗型燃料サイクル概念」に基づいて実施している。

KAERIの進める使用済み燃料処理・処分の概念は、PWRの使用済み燃料をCANDU炉で使用するDUPIC（Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU Reactors）計画、使用済み燃料を電解還元法で処理することにより容積、発熱、線量を低減化することを狙ったACP（Advanced Spent Fuel Conditioning）計画、そして長期毒性を低減化するための分離変換技術開発で構成される。分離変換技術の内、核変換部分は、HYPER（Hybrid Power Extraction Reactor）と呼ばれるADSを中心としており、超ウラン元素（プルトニウムとMA）とTc-99やI-129といった核分裂生成物が核変換の対象である。HYPERの詳細は後ほどSong氏の講演の項で述べる。

KOMAC (Korea Multi-purpose Accelerator Complex) 計画は、21 世紀フロンティア研究開発計画という国家プロジェクトの一つとして開始された多目的加速器計画である。2011 年頃までに 20mA×100MeV の線形加速器を建設し、ナノテクや生命科学などに活用するが、最終的には 1GeV までエネルギーを増強して ADS の開発に使用することである (図 5 参照)。

韓国では、欧州で行われている MEGAPIE 計画や鉛ビスマス腐食試験での国際協力並びに米国との ADS 設計や金属燃料技術に関する協力を進めている。今後、アジア地域での原子力の重要性を考えると、近隣国同士の協力を活性化する必要があり、KAERI は ADS 分野での協力を積極的に寄与したいとのことであった。

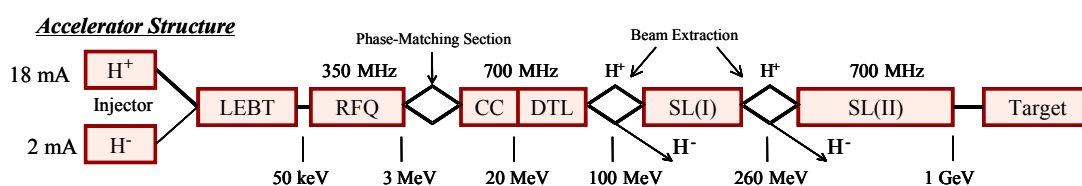


図 5 韓国が進める KOMAC 計画の加速器概念図

6. 中国の状況

中国における ADS の研究状況について、中国原子能科学研究院 (CIAE) の院長である Zhixiang Zhao 氏が講演した。

中国では、21 世紀半ばには 1200GW の発電容量が必要となるため、原子力の重要性が増すと考えられている。中国ではウラン資源に限られているため、核燃料サイクルの確立によりウラン利用率を高める必要があり、高速増殖炉の開発が進められている。ADS は、MA 核変換だけでなく、より安全な新型エネルギー源としての役割も期待されている。このような背景の下、国家重要基盤研究開発計画として 1995 年から ADS の研究開発が始まった。

ADS 用の大強度陽子加速器としては、30mA×1GeV の超伝導線形加速器の研究開発を進めている。これまでに 65mA のイオン源を試作し、信頼性の確認等を行ったほか、RFQ (高周波四重極加速管) についての技術は CERN、韓国等との国際協力で得ている。

未臨界炉物理については、IAEA のベンチマーク解析に参加すると共に、軽水減速臨界実験装置 DF-3 において Cf-252 中性子源を用いた ADS 基礎実験を行い、データの蓄積を図っている。

核破砕ターゲット関連では、液体ターゲットの流動計算、核破砕中性子の特性計算、ビーム窓の照射損傷効果の計算等の解析的研究に加え、炭素イオン等の照射による構造材の照射や固体ターゲットと冷却材の共存性試験等の実験的研究も実施している。

今後の予定としては、イオン源の増強、RFQ 加速器の製作、DT 中性子源と臨界実験装置 (多様な中性子スペクトルに対応可能) を組み合わせることで ADS の様々な炉物理特性を検

証する VENUS 実験（詳細は後述の Xia 氏の講演）等を実施していく。

中国では ADS の研究開発はまだ緒に就いたばかりであり、投入できる予算は少ないが、革新的な原子力エネルギーシステムとして様々な技術選択肢について幅広く研究開発を行っていききたいとのことであった。

韓国の参加者から、韓国や日本の環境に配慮して、中国では原子力の利用をもっと推進すべきだとのコメントがあった。

7. 京都大学原子炉実験所の計画

京都大学教授の代谷誠治氏から、加速器駆動未臨界炉（Accelerator Driven Subcritical Reactor : ADSR）プロジェクトに関する講演があった。

京都大学原子炉実験所では、中性子ファクトリー計画の最終目標として ADSR の検討を実施している。これまでに、概念設計や臨界集合体 KUCA と DT 中性子源を組み合わせた未臨界実験等を実施してきた。

2002 年には、文部科学省の公募型事業として「固定磁場強収束（Fixed Field Alternating Gradient : FFAG）シンクロトロン加速器を用いた ADSR の技術開発」が採択され、5 年間の研究開発が開始された。FFAG 加速器は KEK で開発中（詳細は後述の森氏の講演）であり、これを KUCA に隣接して設置し ADSR の炉物理実験を行う計画である。ここで製作する FFAG 加速器の陽子加速エネルギーは 2.5~150MeV で可変であり、炉物理特性の陽子入射エネルギー依存性などに着目した実験を行う予定である。

8. 日本における大強度陽子加速器プロジェクト : J-PARC

KEK 教授の永宮正治氏から、原研と KEK が共同で進める J-PARC の現状について講演があった。永宮氏は、J-PARC のプロジェクト・ディレクターである。

J-PARC は、600MeV 線形加速器（0.2MW）、3GeV シンクロトロン（1MW）及び 50GeV シンクロトロン（0.75MW）の 3 つの加速器に、物質・生命科学実験施設、核物理・素粒子物理実験施設及び核変換実験施設といった主要実験施設を結合した多目的加速器研究施設群である。2001 年度から第 1 期施設（線形加速器の一部を除く加速器部分と物質・生命科学実験施設及び核物理・素粒子物理実験施設）の建設が開始されており、2006 年度には完成する見込みである。核変換実験施設を含む第 2 期施設は、第 1 期の進捗や予算の状況を勘案して開始する。

9. 日本における ADS 用加速器の研究開発

KEK 教授の森義治氏が、原研と KEK で進められている超伝導線形加速器の開発と、KEK で進められている FFAG 加速器の開発の状況について講演を行った。

ADS 用加速器は、1GeV 程度の加速エネルギー、10mA オーダーのビーム電流（即ちビーム出力 10MW 程度）の連続ビームで、加速効率は 30%以上が必要である。また、ビー

ムトリップが少なく信頼性が高いことが求められ、さらには低コストでなければならない。

原研と KEK で進める超伝導線形加速器の研究開発は、1995 年頃から始まっており、現在までに単セル空洞の試作、多重セル空洞の試作、クライオモジュール試験機の製作・試験等を行ってきた。空洞は、ひょうたん型のニオブ製の筒であり、低温での強度、極めて精度の高い表面仕上げが要求される。試験では、表面でのピーク電界を測定し、優秀な結果を得ている。クライオモジュールは多セル空洞を 2 基収納し、空洞を液体ヘリウムで冷却すると共に、高周波を供給する役割のものである。J-PARC では 400MeV から 600MeV の加速にこの超伝導線形加速器を用いる予定であり、2005 年度頃からの建設着手を目指した研究開発が行われている。

円形加速器については、固定磁場とできるサイクロトロン長の所と、強いビーム収束が可能なシンクロトロン長の所を兼ね備えた FFAG 加速器の開発を KEK で行っている。FFAG 加速器は、近年、高透磁率金属磁性体を用いた空洞が開発されたことにより、実現に向けた取り組みが開始された。現在、陽子を 500keV まで加速する原理実証 FFAG 加速器の製作・試験に成功し、続いて、150MeV まで加速できる FFAG 加速器の製作を実施中である。FFAG 加速器は、前述の京大炉での ADSR 実験にも使用することになっている。

10. 韓国における ADS の設計と実験研究

KAERI で ADS 開発のリーダーを務める Tae Yung Song 氏から、韓国の ADS である HYPER について、設計研究の現状と、関連する技術開発について講演があった。

図 6 に示すように、HYPER は熱出力 1000MW の核変換用 ADS で、TRU (プルトニウムと MA) と I-139 や Tc-99 といった核分裂生成物を核変換の対象としている。実効増倍係数 k_{eff} は 0.98 である。金属燃料を用い、TRU の富化度は 34% から 44% 程度である。燃

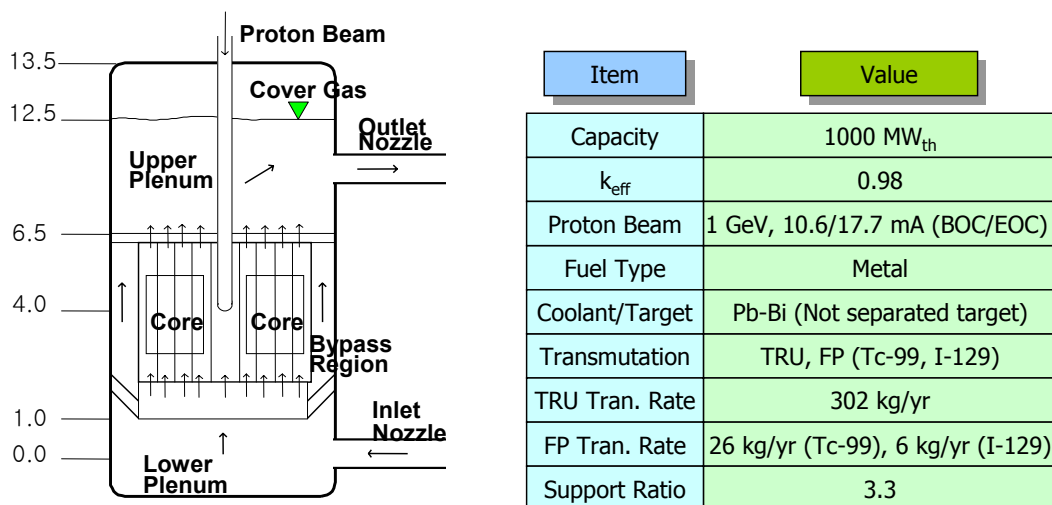


図 6 韓国の進める HYPER の概念図と諸元

焼反応度変化を抑制するために、制御棒を備える。燃焼は 180 日サイクルとし、1GeV の陽子ビームで、燃焼初期は 10.6mA、燃焼末期は 17.7mA の電流が必要となる。炉心冷却材と核破砕ターゲットには共に鉛ビスマス共晶合金を用いる。

KAERI では、ADS の研究開発を国際協力の下に進める方針であり、自国では、上記 HYPER の設計研究の他、鉛ビスマス共晶合金による材料腐食の実験、金属燃料の物性測定等に重点を置いている。また、研究炉 HANARO における核分裂生成物の照射試験も計画されている。

11. 中国における ADS 炉物理実験

CIAE で ADS 研究のリーダーを務める Haihong Xia 氏から、ADS の炉物理実験の今後の計画について講演があった。

Venus-I と呼ばれる実験計画は、コックロフト・ウォルトン型加速器を使った DT 中性子源及び DD 中性子源を実効増倍率 0.90~0.95 の未臨界体系に設けるものである。ターゲットの周りは中性子スペクトルを変えられる領域で、少量の濃縮ウランを用いて平均エネルギー 700keV 程度の高速中性子場を形成する。その周りは天然ウランを用いた熱中性子領域で構成する。飛行時間法、He-3 比例計数管、固体飛跡検出器等を用いた中性子スペクトル測定や、放射化箔や核分裂計数管を用いた反応率比測定等を行う予定である。

次に予定される Venus-II 実験では、熱出力を伴う ADS の実験を考えており、150MeV-3mA の陽子線形加速器を現有の 3.5MW 軽水冷却研究炉に結合する方法と、100MeV のサイクロトロンに 1MW の新たな水冷却未臨界炉を結合する方法を検討している。

12. 日本における核データの研究開発

東京工業大学助教授の井頭政之氏が、日本における核データ整備の現状と、MA 核データ測定プロジェクトについて講演した。

現在、10 機関が連携して MA 断面積測定プロジェクトを実施している。測定技術の開発としては、 4π ゲルマニウム・スペクトロメータを製作し、放射捕獲断面積の高精度測定に資する。測定対象の MA は、Np-237、Am-241、Am-243 等であり、原研の JRR-3M、京大の LINAC、東北大のサイクロトロンを中性子源として使用する。また、実験結果に基づく核データ評価を行うと共に、総合核データ利用システムを開発して、成果の一般への普及を図るとのことである。

13. パネル討論「ADS の将来と国際協力」

2 日目の午後には、4 つのキーノート・トークに関連して、パネル討論を行った。

13.1 キーノート・トーク 1：原子核物理学と核変換技術

CERN で ADS 関連核データの測定プロジェクトである n_TOF 計画を進める Alberto

Mengoni 氏から、欧州における原子核物理研究者の ADS 開発への寄与等に関する講演があった。

ADS 開発の基礎を支える実験的研究として、欧州では、未臨界炉物理実験 MUSE、高・中間エネルギー核データ測定 HINDAS、低エネルギーまで含めた核データ測定 n_TOF の 3 つを進めている。

MUSE では、高速炉臨界実験装置 MASURCA に接続した GENEPI と呼ばれる重陽子加速器の開発で、加速器研究者が寄与している。HINDAS では、20MeV から 2GeV の範囲で鉛、ウラン、鉄の核データを測定・計算・評価するもので、ADS における核破砕中性子源特性の高精度化や高エネルギー粒子遮蔽の高精度化等に寄与するものである。

n_TOF プログラムは、欧州原子核研究機構 (CERN) で行われている国際プロジェクトで、20GeV まで加速した陽子を鉛ターゲットに当てて大量の中性子を発生させ、200m の先の検出器で飛行時間法による断面積測定を行うものである。測定対象の中性子エネルギーは、1eV から 250MeV と極めて広範囲である。天文学や基礎的な核物理学の目的も併せ持つ多目的実験プロジェクトとなっているのが特徴である。陽子パルスの繰り返しは約 0.4Hz と少ないが、1 パルス当たり 2×10^{15} 個の中性子が発生する。これにより、約 190m 離れた測定点で $10^5 \sim 10^6$ n/pulse/cm² の中性子密度を保ちながら、高いエネルギー分解能 (例えば、100keV で $\Delta E/E = 2 \times 10^{-3}$) 得ることができる。測定対象は、MA の他、LLFP、トリウム、鉛等、ADS やエナジー・アンプリファイアーに関わる核データを取得している。

[主な議論] (Q:質問、A:回答、C:コメント)

Q: ここで測定する断面積は ADS の設計などに応用するのが目的だが、原子核物理研究者の興味はどのようなところにあるのか?

A: 宇宙物理に興味を持っている人が多い。現在の参加者は、30 の国から 100 人程度だ。

Q: 断面積測定と積分実験を比較して、相互にフィードバックするのが重要だ。そのような計画があるか?

A: 今後、感度解析を実施していく予定だ。

13.2 キーノート・トーク 2 : ADS の技術課題

筆者が、ADS の実現に向けての技術課題を以下の 8 項目に整理した。

(1) 加速器

ADS 用加速器は、高効率、低コスト、高信頼性、低ビームロス、大強度等が要求される。信頼性に関しては、ビームトリップによる炉容器等の構造物に対する熱衝撃の観点から検討する必要がある。

(2) 核破砕ターゲットとビーム窓

核破砕ターゲットは、熱特性に優れていることや中性子吸収が少ないこと等から鉛・ビスマス共晶合金が主流となっている。ビーム窓は、高温、陽子・中性子照射、ターゲ

ットによる腐食等、過酷な環境にさらされるため、今後の成立性検証が不可欠である。

(3) 未臨界炉物理

実効増倍係数をどの程度に設定するのが最適なものの議論が尽くされていない。また、未臨界度の監視方法やホットスポットファクターの低減方法も今後の研究課題である。

(4) 制御

燃焼反応度の補償方法として、加速器出力を調整する方法と制御棒を用いる方法について事故評価を含めた検討が必要である。MA 燃焼に伴う反応度変化の精度は極めて不十分と考えられ、今後のデータ取得が必要である。ADS では、スタートアップ時やビームトリップ時等に、従来の原子炉とは異なる運転方法を強いられる。

(5) 炉心冷却材

鉛・ビスマス、ナトリウム、ヘリウム等が冷却材候補として検討されているが、鉛・ビスマスが現在最も有望視され研究開発の対象となっている。鉛・ビスマスで問題となるのは鋼材の腐食であるが、適度な酸素濃度を保つこととで回避できると考えられている。

(6) MA 燃料

MA の濃度を高くして核変換効率を上げるためには MA が安定に共存できる窒化物燃料が有望だと考えられている。今後、MA 窒化物燃料の照射実験を国際協力の下に実施すべきである。

(7) 構造

ビーム導入機構、ビームダクト、ターゲット/冷却材の流量配分機構、ビーム窓交換機構等、従来の原子炉にはなかった構造の定量的な成立性検討を実施すべきである。

(8) 安全性

陽子ビームの停止により体系を即座に深い未臨界状態にすることができるため、固有で受動的な安全系が設定しやすいと考えられる。これまでの原子炉の安全評価想定してきた過渡変化や事故をどの程度継承すべきかなど、確率論に基づく検討が必要である。

以上の技術課題の克服を目指して、以下の 5 点が重要であるとした。

(a) 信頼性の高い加速器の開発

(b) 鉛・ビスマス技術開発の国際協力による効率化

(c) 実効増倍係数の最適化、安全性評価、制御方法、核データ信頼性等に関する国際的な議論。

(d) MA 燃料開発における国際協力

(e) 小型 ADS の運転経験蓄積と、高出力鉛・ビスマス核破碎ターゲットの運転経験蓄積。

これらの国際協力を通して技術課題を克服し、2015 年を目途に熱出力 100MW 程度の

実験炉級 ADS を国際プロジェクトとして立ち上げることを提案した。

[主な議論]

C: 多くの技術課題が存在し、国際協力が極めて重要であることが分かった。核融合研究における協力体制などが参考になるかも知れない。

C: 多くの技術課題を国際的なネットワークで克服していくのが良いのではないか。特に、加速器の安定性については、世界中の加速器の統計を蓄積する必要がある。

13.3 キーノート・トーク 3: ベトナムにおける原子力利用計画とアジア ADS ネットワークへの見解

ベトナム原子核科学技術研究所の所長である Vo Van Thuan 氏がベトナムにおけるエネルギー事情と原子力導入の検討状況、並びに ADS 研究開発への期待について講演した。

ベトナムでは総発電量の 53%を水力発電が、18%をガスタービン発電が、15%を石炭火力が占めている。しかし、現在の急速な経済成長が今後も続くとする、2020 年頃には現在の数倍の発電容量を確保する必要があると見られ、原子力発電の可能性を今から考慮しておかなければならない。そこで政府は 2002 年より予備的な適用性検討を開始したが、他国と同様に、安全性と放射性廃棄物処分が原子力の利用を考える上で問題となっている。放射性廃棄物処分に関しては、ADS を用いた核変換技術が有望なようであるが、実用化に向けた開発をベトナムのような開発途上国が一国で行うのは不可能である。そこで、現在は原子力発電を採用していない国も含め、ADS の研究開発に関するネットワークを立ち上げることができれば、原子力の今後の発展に大いに役立つと考える。また、開発途上国にとっては、このような最新技術に触れる機会を持つことが重要であり、アジア地域におけるこのような取り組みは、地域内の相互理解に貢献するものでもある。

[主な議論]

C: 韓国では、廃棄物処分の見通しのないまま発電所を運転しており、問題となっている。原子力利用を開始する前から廃棄物の処分方法について検討することは意義深いことである。

13.4 キーノート・トーク 4: アジア ADS ネットワークの設立

大阪大学核物理研究センター教授の永井泰樹氏より、日本における原子核物理研究者の ADS 研究への取り組みに関する現状報告と、アジアにおける ADS 研究開発に関するネットワーク的な協力関係構築の呼びかけがあった。

日本では、原研と KEK の陽子加速器計画が統合されたことにより、原子核物理研究者の ADS に対する関心が高まり、1999 年に「加速器駆動未臨界炉と原子核物理」というワークショップが開催され、原子核物理分野と原子力工学分野の交流が始まり、異分野間交流による相乗効果が期待されている。

一方、ADS に関する国際協力を考えたときに、成長著しいアジア諸国と日本の協力が

極めて希薄であり、原子核物理分野の研究者も含めたネットワーク的な協力関係構築が必要であると感じる。そこで、原子核物理と原子力工学の交流の活性化、情報の交換、ADS に関する国際会議の開催、個別技術の研究開発に関する協力の促進等を狙った「アジア ADS ネットワーク」の設立を提案する。本ネットワークは ADS に関心のある全ての人の参加を受け付けるものとした。

[主な議論]

- C: このネットワークが研究者からのボトムアップ型であればうまく行くと思う。トップダウンでは長続きしないだろう。
- C: 研究開発にはトップダウンとボトムアップの両方が必要である。多くのボトムアップ型提案があった場合、その優先順位を決めるのがトップダウンだ。政治家の賛意を得て予算を獲得することも必要である。このような取り組みでコミュニティーの声を揃え、働きかけていくことが重要だ。

13.5 自由討論

筆者が、今後のネットワークの進め方について、KAERI の Song 氏及び CIAE の Xia 氏と話し合った結果を紹介した。まず第 1 段階として、メーリングリストを立ち上げ、ニュースレターなどによる情報交換を行う。次に第 2 段階として、2 国間や多国間の協力の可能性を探る。具体的な協力分野の候補としては、ADS の設計研究、安全性検討、加速器開発、鉛ビスマス技術、J-PARC における核変換実験施設計画への参加、核データの高精度化等を挙げた。最後に、第 3 段階としては、国際共同プロジェクトによる実験炉級 ADS の建設への発展が考えられる。

- C: (KAERI の Park 副理事長) 大いに賛成だ。KAERI からの協力を促進したい。
- C: (CIAE の Zhao 院長) 中国ではまだ ADS の研究開発を開始したばかりであり、このようなネットワーク的協力は非常に有意義だ。
- Q: 世界のトップレベルの頭脳を結集すべきであり、協力をアジアに限定する理由が分からない。
- A: まずはアジアでの協力から始めるのであり、将来的にはより大きなものに発展することを期待している。
- C: 韓国と日本、或いは KAERI と原研には既に包括的な協力取り決めがあり、協力項目を加えるだけで容易に協力を開始できるはずだ。

自由討論の最後に、座長を務めた山崎敏光氏（理研）よりまとめのコメントがあった。

ADS はまだ未成熟の技術分野であるが、今後も安全性が高く環境負荷の低いシステムの実現に取り組んでいくべきだ。このような取り組みが夢のある分野を切り開き、若い研究者・技術者を引きつけるようになることを期待している。この観点からも、アジアの、又は世界の ADS ネットワーク設立は有意義だと考える。

14. おわりに

シンポジウムの最後に、京大の代谷氏があいさつを行い、閉会となった。また、1日目の夕刻には懇親会を開催し、有馬朗人参議院議員の出席も得て、異分野間交流・国際交流を深めた。

今回のシンポジウムは、大阪大学の永井先生が、欧州での大規模な国際協力体制に刺激を受けられたことがきっかけで、発案されたものです。シンポジウムの開催は、原研、京大、阪大、東工大、KEK が協力して行いました。この意味で、ADS の研究に関する国内協力のきっかけともなるシンポジウムであったと思います。最後に、年度末のお忙しい中を発表者・座長を快く引き受けて下さった皆様、会場用意等に奔走してくれたスタッフに、この場を借りて心から感謝の意を表します。



シンポジウムの様子