



第 2 回ワークショップ 「加速器駆動型未臨界炉と原子核物理」開催報告

日本原子力研究所
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

はじめに

加速器駆動型未臨界炉 (ADS) と長寿命放射性廃棄物の核変換技術に関して、核物理と原子力の専門家が一同に会し、最新の情報を共有すると共に、原子核物理学からの貢献を模索することを目的として、平成 14 年 1 月 24、25 日に、原研東海にて、原研・京大炉・核物理委員会の共催で標記ワークショップを開催した。なお、第 1 回は平成 12 年 3 月に KEK にて開催されている。

参加者は 81 名であり、内訳は、大学 28 名、原研 34 名、KEK8 名、メーカー 8 名、その他 3 名であった。

次ページにプログラムを示す。以下、会議の概要を報告する。文中「」内は講演内容を示している。

1. ワークショップ趣旨説明

本ワークショップの発起人の一人である永井泰樹氏 (大阪大) より、ワークショップの趣旨と経緯が説明された。

「原研 - KEK 共同で進めている大強度陽子加速器プロジェクトをきっかけに、ADS 及び核変換に関する研究開発に原子核物理コミュニティとしての関わり方を模索するべく、第 1 回目ワークショップがおよそ 2 年前に開催された。第 1 回目は 150 名の参加を得て、核変換研究とエネルギー増幅基礎研究の観点から、原子核物理サイドと原子力サイドの研究開発の現状が示された。その後、物理学会におけるシンポジウム (平成 12 年 9 月) や、原子核研究誌における特集記事 (46 巻第 2 号) 等、原子核物理コミュニティへの情報提供が精力的になされてきた。これらの動きの中から、『原子核物理と原子力の広い分野における原子力エネルギーの科学的進展に寄与する』ことを目指して、懇談会『加速器駆動型未臨界炉と原子核物理』が平成 13 年 8 月に発足した。第 2 回目となった本ワークショップは、懇談会発足後の最初の会合である。本ワークショップでは、

第2回 ワークショップ「加速器駆動型未臨界炉と原子核物理」

(平成14年1月24・25日、日本原子力研究所・先端基礎研究センター大会議室)

プログラム

1月24日(木)

13:00~14:40

座長：柴田 徳思(KEK)

- | | | | |
|---|-------------------------|------------|--------|
| 1 | はじめに | 永井 泰樹(阪大) | 10分(5) |
| 2 | 統合計画 | 永宮 正治(KEK) | 20分(5) |
| 3 | 加速器駆動型未臨界炉(ADS)システムについて | | |
| | 核変換研究 | 大井川 宏之(原研) | 25分(5) |
| | エネルギー増幅研究 | 的場 優(九大) | 25分(5) |

14:50~16:40

座長：板橋 隆久(阪大)

- | | | | |
|----|-------------------|------------|--------|
| 4 | ADSシステム開発現状 I | | |
| a) | 加速器開発の現状 | | |
| | 線型加速器 | 山崎 良成(KEK) | 25分(5) |
| | FFAG | 森 義治(KEK) | 25分(5) |
| b) | 核破砕標的開発の現状 | | |
| | Pb・Bi 標的と核破砕中性子特性 | 菊地 賢司(原研) | 15分(5) |
| 5 | ADSによらない核変換 | | |
| | サイクル機構における研究 | 池上 哲雄(JNC) | 25分(5) |

16:50~17:40

- | | | | |
|---|-------|------------|--|
| 6 | 自由討論 | | |
| | キーノート | 大井川 宏之(原研) | |
| | 自由討論 | | |

- - - 終了後 懇親会 - - -

1月25日(金)

9:20~12:00

座長：井上 信(京大炉)

- | | | | |
|---|------------------|---------------------|---------|
| 7 | 特別講演 | | |
| | ADSシステム「現状と将来」 | 高橋 博(BNL) | 50分(10) |
| 8 | ADSシステム開発現状 II | | |
| | 京大炉における研究 | 代谷 誠治(京大炉) | 25分(5) |
| 9 | ADSシステムと原子核物理 | 座長：ベンツ ヴォルフガング(東海大) | |
| | ADSのための断面積評価 | 深堀 智生(原研) | 20分(5) |
| | 標的実験と数値計算 | 仁井田 浩二(RIST) | 20分(5) |
| | 核反応クラスター生成と分子動力学 | 小野 章(東北大) | 20分(5) |

13:00~15:20

座長：篠塚 勉(東北大)

- | | | | |
|----|---------------------------------|------------|--------|
| 10 | 話題 | | |
| | ^{229}Th (4eV) 励起状態の研究 | 三頭 聡明(東北大) | 25分(5) |
| 11 | ADSシステム開発-世界との関わりと将来- | | |
| | n-TOFプロジェクト | 永井 泰樹(阪大) | 15分(5) |
| | 統合計画での研究 | 井頭 政之(東工大) | 15分(5) |
| 12 | 自由討論 | | |
| | キーノート | 井上 信(京大炉) | 15分 |
| | 自由討論 | | 45分 |

15:30~16:30

施設見学(加速器、核破砕ターゲット)

大強度陽子加速器プロジェクトの状況、ADSに関する研究開発の現状、原子核物理の最近のトピックス等について理解を深めると共に、両コミュニティの今後の関わり方等について議論することを目的とした。」

2. 大強度陽子加速器プロジェクト

プロジェクトの現状について、永宮正治氏(KEK・原研)から説明があった。

「0.6GeV、3GeV、50GeVの陽子加速器を用いて、核変換、物質・生命科学、原子核・素粒子の各分野で世界最先端の性能を誇る実験施設を建設する。平成13年度の建設着

手(第1期)が予算化されている。核変換実験施設は第2期施設に位置付けられており、できるだけ早期に立ち上げたいと考えている。現在、国際アドバイザー委員会や利用者協議会を組織し、外部からの意見を積極的に採り入れている。また、施設完成後の運営体制についても、外部委員を交えた議論を行っている。」

3. 加速器駆動未臨界炉(ADS)の概要と原研における取り組み

ADSの原理と原子核物理学の立場からみた研究課題について、的場優氏(九州大)が講演を行った。エネルギー増幅の手段としてのADSに関して、1000年の単位で人類のエネルギー源を考えた場合、化石燃料と ^{235}U 枯渇後が不透明であり、高速炉やトリウム燃焼のオプション技術としてその可能性を模索すべきであるとの提言があった。

原研における加速器駆動核変換システムへの取り組みについては、筆者が説明を行った。

「原子力利用で発生する高レベル廃棄物に含まれるマイナーアクチニド(^{237}Np 、 ^{241}Am 、 ^{243}Am)と長半減期FPの一部(^{129}I 、 ^{99}Tc)を、ADSを用いて核変換することを目指している。ADSの研究開発のために、大強度陽子加速器プロジェクトの一環として、核変換物理実験施設とADSターゲット試験施設から成る核変換実験施設を建設する計画である。前者では、 $600\text{MeV} \cdot 10\text{W}$ の陽子ビームと臨界実験装置を組み合わせることでADSに関する炉物理実験を行い、後者では、 $600\text{MeV} \cdot 200\text{kW}$ の陽子ビームと鉛ビスマス液体金属ターゲットを組み合わせることで材料照射や核破砕ターゲット技術の開発を行う。原研で



は、その他、高レベル廃棄物の群分離、核変換用窒化物燃料と照射済み燃料処理技術、廃棄物処分の合理化等の研究も進めている。」ADS の型式として、熔融塩を用いた熱中性子系と、原研の提案する高速中性子系の得失について議論があった。

4. 加速器開発の現状

線型加速器の開発状況について山崎良成氏（KEK・原研）が講演を行った。

「大電流化のボトルネックとなっているのは低エネルギー部のビーム損失であり、ビーム径を小さくすると共にハロー発生を抑止する必要がある。また、連続ビーム運転を考えた場合には、加速電場を大きくできること、加速効率を高くできること等から超伝導加速器が魅力的である。現在、原研と KEK が共同で超伝導線型加速器の研究開発を進めている。」ビームトリップの頻度や地震への対応等に関する質疑があった。

シンクロトロン加速器の一種である FFAG の開発状況について森義治氏（KEK）が講演を行った。

「FFAG では加速途中で磁場が変化しないため、加速の繰り返しを早くでき、デューティ・ファクターの高い大強度ビームをコンパクトな加速器で提供できる可能性がある。現在、原理検証用加速器 PoP-FFAG を製作し、50keV から 500keV への加速に成功している。」

5. 核破碎ターゲット技術

菊地賢司氏（原研）が、鉛ビスマス液体金属ターゲットの特性と研究開発の現状について報告した。

「原研では、ADS ターゲット試験施設（200kW ビーム）、実験炉級 ADS（2MW ビーム）、実用 ADS（20～30MW ビーム）と段階的に ADS 開発を展開したいと考えている。核破碎ターゲットとしては鉛ビスマス共晶合金を第 1 候補として選定し、試験ループや静的装置を用いた腐食試験、酸素濃度制御技術の開発、ポンプ・流量計等の必要機器類の開発等を進めている。ADS ターゲット試験施設では、陽子ビーム窓の健全性評価、陽子・中性子照射と材料腐食に関する研究、核破碎生成物と放射化生成物であるポロニウムの管理技術実証等を行い、次段階へ進むためのデータベース構築と経験蓄積を図る。」

6. サイクル機構における核変換研究の現状

ADS によらない核変換手法として、サイクル機構における核変換研究の現状に関する講演を池上哲雄氏（サイクル機構）が行った。

「サイクル機構では、プルトニウムとマイナーアクチニドを分けずに高速炉で核変換する概念の検討を進めている。Am-MOX 燃料や Np-MOX 燃料の製造、常陽における照射試験等を進めている他、マイナーアクチニドや長半減期 FP の断面積測定等にも積極

的に取り組んでいる。」

7. 特別講演

高橋博氏 (BNL) の特別講演では、ADS と ATW 概念の解説、地下埋設型炉の概念提起等がなされた。

「米国で核変換用として考えられている ATW は、高速中性子体系であり、遅発中性子が少ないこと、正のボイド反応度となること、ドブラー反応度が小さいことなどから未臨界度を深くせざるを得ないため、コストが高くなる。エネルギー生産や核分裂性物質生成を目的とした ADS であれば、浅い未臨界度にすることができる。何れの場合でも、高速中性子体系は熱中性子体系に比べて高い燃焼度と高い中性子経済が得られる点で有利である。」

8. 京大炉における研究開発

代谷誠治氏 (京大炉) からは、京大炉における ADS 研究への取り組み及び将来計画に関する講演があった。

「KUR 型の加速器駆動未臨界炉 ADSR の設計研究では、MCNPX コードを用いた計算により、様々な入射陽子エネルギー及びターゲット材料について、未臨界度と熱出力の関係、中性子スペクトルの場所及び時間依存性等を検討している。KUCA を用いた未臨界実験では、DT 中性子源を用いた即発減衰定数等を測定している。ADS における中性子増倍は $1 / (1 - k_{\text{eff}})$ に比例するため、 k_{eff} に含まれるわずかな誤差が中性子増倍特性の予測精度に影響を及ぼす。この観点から、核データ及び核計算法の精度向上が不可欠である。」

9. 原子核物理の現状

ADS のための断面積評価として、JENDL 高エネルギーファイルの現状に関して、深堀智生氏 (原研) が講演を行った。中性子と陽子について 3GeV までのデータを 123 核種に対して整備している。実験データ、理論計算、経験式等を組み合わせた高エネルギー核データ評価手法の解説と、ベンチマーク計算結果の紹介があった。

核破砕ターゲットにおける核計算の現状と実験との比較について、仁井田浩二氏 (RIST) が講演を行った。NMTC/JAM コードと MCNP4C コードを組み合わせ、10GeV を超える高エネルギーから 1MeV 以下の低エネルギーまでの核反応を取り扱えるシステムを整備している。KEK における鉛ターゲットへの 0.5、1.5、12GeV 陽子入射実験、AGS における水銀ターゲットへの 1.6、12、24GeV 陽子入射実験等との比較が示された。

小野章氏 (東北大) からは、核反応クラスター生成と分子動力学について講演があっ

た。AMD を用いて重イオン反応や核子入射による標的核の破砕を記述する手法の現状等についての報告であった。

三頭聰明氏（東北大）は、非常に低い励起状態である ^{229}Th の 3.5eV アイソマー・レベルの崩壊に関する講演を行った。

片山一郎氏（KEK）は、KEK と原研が共同で計画している短寿命核ビーム実験施設に関する講演を行った。

10. 世界の計画

永井泰樹氏（大阪大）から、欧州連合が進める n-TOF プロジェクトと、鉛による中性子減速を利用した FP 核変換の概念に関する報告があった。

「n-TOF プロジェクトでは、ADS、天体核物理、基礎物理等の研究を目的に、CERN の 24GeV 陽子により、230m もの飛行距離で高いエネルギー分解能を狙っている。FP 核変換に関しては、鉛中での中性子減速が小さなレサジーステップで起こることを利用し、捕獲断面積の共鳴付近のエネルギーを持つ中性子を増加させる概念が検討されている。」

11. 原子力学会からの要望

井頭政之氏（東工大）からは、原子力学会における大強度陽子加速器プロジェクトへの要望取りまとめに関して説明があった。原子核物理分野からの核変換実験施設への要望について、議論の場が必要とのコメントがあった。

12. 自由討論

自由討論は、1 日目、2 日目のそれぞれ最終セッションを当てた。1 日目の自由討論では、核物理の立場から、政池明氏（奈良産業大）が ADS に関する研究を進める上で問題となる点を以下のようにまとめた。

- ・核変換 or/and エネルギー増幅 ?
- ・高速中性子系、熱外中性子系、熱中性子系 ?
- ・加速器の不安定性 ・再処理、リサイクル、貯蔵との関連
- ・国策との関連の克服 ・経済性 ・安全性
- ・トリウム、マイナーアクチニド、FP 等についての基礎データの必要性
- ・燃料の対象（マイナーアクチニド、プルトニウム、トリウム）

1 日目はプログラム進行の遅れから残念ながら十分な自由討論の時間を確保できなかったが、上記の問題点に対しての原子力の立場からの見解については、2 日目の高橋博氏の特別講演（既述）においてトピックスとして取り上げられた。

2 日目の自由討論では、井上信氏（京大炉）がキーノート・トークを行った後、大学・原研・KEK 等の役割分担、大学における研究資金の調達方法等について議論がなされた。また、筆者が、ADS 及び核変換研究の立場から、核物理分野に対して期待している事項について以下の 3 つの枠組みで捉えるべきあるとのキーノート・トークを行った。

断面積測定やシミュレーション手法開発などの直接的な寄与
トリウム ADS や溶融塩 ADS 等の概念創出による寄与
半減期短縮や断面積操作等の斬新な核変換法の創出

また、大強度陽子加速器プロジェクトの核変換実験施設への要望、フォトンを用いた核変換の可能性、化学分野との連携、人材育成等の問題について、活発な議論が行われた。

13. 懇親会及び施設見学

懇親会は、1 日目の夕刻から東海会館において行われた。普段は接触することの少ない核物理分野と原子力分野の研究者が、互いに親交を深める良い機会となった。

2 日目のプログラム終了後、原研東海における線型加速器及び水銀ターゲットの開発状況を見学会を開催した。

おわりに

今回のワークショップは、懇談会『加速器駆動型未臨界炉と原子核物理』が平成 13 年 8 月に発足して以来最初の会合であったため、各分野の現状報告の色合いが強いプログラムとなった。この意味で、所期の目的は達成できたが、次回以降はテーマを少し絞って、両分野において作業を進めていくための役割分担を具体的に模索して行く必要があると考えている。

最後に、本ワークショップ開催にご尽力いただいた大阪大・永井先生、京大炉・井上先生、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。