

 会議のトピックス(IV) 

加速器を利用した応用研究に関する国際会議の報告
AccApp05 - International Conference On Accelerator Application 2005
(August 29 - September 1, 2005, Venice, Italy)

日本原子力研究開発機構
核変換用核データ測定研究グループ
小泉 光生
koizumi.mitsuo@jaea.go.jp

1. はじめに

加速器性能の向上に伴い、高エネルギーでかつ高強度のビームが使用可能となりつつある。それをいれれば、高強度のパルス中性子源、加速器駆動システム (Accelerator Driven System (ADS))、RI 製造などへの応用が開ける。「AccApp05 - International Conference On Accelerator Application 2005 (加速器を利用した応用研究に関する国際会議)」は、粒子加速器技術を含めた様々な加速器利用研究について発表・議論を行う国際会議である。AccApp は、アメリカ原子力学会の賛助で 1~2 年ごとに開催され、過去 6 回は全てアメリカで開催されてきた。第 7 回目にあたる今回は、ヨーロッパにおいて初めての開催となる。会議は 2005 年 8 月 29 日~9 月 1 日の 4 日間、ベニス (イタリア) のサン・セルボロ (St. Servolo) 島にあるベニス国際大学 (Venice International University) で開催された。口頭発表は総合講演で 15 件、パラレルセッションで 115 件であった。これと 35 件のポスターセッションを合わせると、165 件の発表となる。参加国は 27 カ国で、主な参加国は、フランス (9.6%)、ドイツ (10.7%)、イタリア (11.9%)、日本 (11.3%)、スイス (7.9%)、ロシア (4%)、アメリカ (23%) である。

2. 開催地

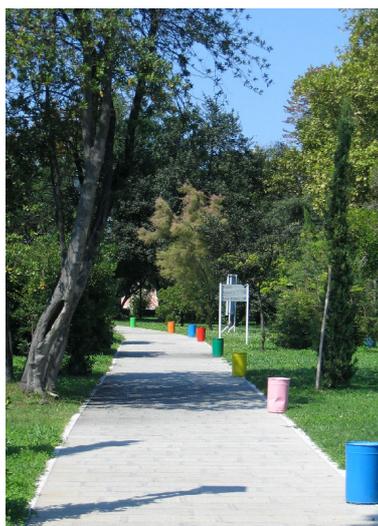
サン・セルボロ島は、ベニスのサンマルコ広場にある船着場 (St. Zaccaria) から船で 10 分程度の距離にある。この島にあるベニス国際大学は、8 つの大学とベニス、Italian Ministry for the Environment and Territory (IMET) によって運営されている。島全体が大学の施設である。学部生には国際交流の場として、修士・博士課程の学生には、経済や、芸術・建築などのプログラムが用意されている。島内には、食堂と滞在用の宿泊施設

があり、国際会議やサマースクールなどにも使われている。宿泊施設はバスルーム付きであった。長期滞在できるように少し広めになっており、服の収納スペースも十分とってあった。備え付けでテレビとインターネットのポートがあり、1泊 60 ユーロでリラックスして宿泊できた。

会議の開催中は晴れの日が続き、日差しのあるところでは非常に暑かった。講堂では、海風が吹き抜けると気持ちよかった。島は小さいが、島内の建造物は余裕を持って建てられており、緑も多く、ちょっとした散策でリフレッシュすることができた。



サン・セルボロ島をサンマルコ（本島）方面から写した。



大学校舎入り口（左） 宿舎とキャンパスをつなぐ道（中） 海が見える門（右）

3. 会議のトピックス

会議の内容は、加速器駆動中性子源と加速器駆動炉の研究を中心に据えたものであるが、それに関連する加速器施設、中性子源、ターゲット、ターゲットと原子炉、高エネルギー粒子による中性子発生や放射化などのシミュレーション及び実験、核データなど多岐にわたる議題が取り上げられた。会議は、総合講演とパラレルセッションを交互に行う形式が取られた。総合講演は午前と午後の 2 回行われ、コーヒブレークの後で、パラレルセッションに移った。ちなみにパラレルセッションのカテゴリーは以下の通り

であった。

(1) Accelerator Applications、(2) System Engineering、(3) Nuclear Data and Experiments、
(4) Material Issues、(5) Integration Systems、(6) High Power Accelerators、(7) Codes and Models

本稿では、総合講演の内容について簡単に紹介させていただく。講演内容は著者の専門外の分野の報告もあったが、加速器を用いた原子力分野について、広く研究情報を得ることができた。末尾に総合セッションのプログラムを掲載しておくので興味のある方は見て頂きたい。また、会議録は、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A に 2006 年のはじめごろ掲載される予定なので、詳細な内容については、そちらを楽しみにしていただきたい。なお、次回の開催は、アイダホ国立研究所の主催で 2007 年に行われる事が決定した。

3.1 核破碎中性子源

核破碎中性子源は、高速パルス中性子を発生するだけでなく、加速器性能によっては研究用原子炉を上回る強度の中性子場を発生することができる。加えて、日本やヨーロッパでは研究用原子炉がシャットダウンしているため、核破碎中性子源の中性子利用研究における重要性は、今後ますます高まっていくと思われる。稼働中の核破碎中性子源施設としては、PSI (Paul Scherrer Institute) の SINQ (Swiss Spallation Neutron Source) と LANL (Los Alamos National Laboratory) の LANSCE (Los Alamos Neutron Science Center) が紹介された。建設中の中性子源としては、Oak Ridge National Laboratory (ORNL) の SNS (Spallation Neutron Source) と原研の J-PARC が紹介された。今後 1 MW 以上の中性子発生装置が稼働し始めることになる。それに伴い、大強度ビームの過酷な環境にさらされるターゲット・シールド材の開発が必要とされている。多くの研究機関で、液体金属を用いたターゲット材の開発が精力的に進められている。

(1) PSI

PSI ではサイクロトロンからの陽子ビーム (cw、590MeV、1.3mA) を固体ターゲットに照射し、 10^{14} n/cm²/s の中性子場を得ている。中性子強度を増やすために、加速器のアップグレードを進めている。2005 年中に電流量を 2.6mA まで増やす予定である。ターゲットでは、MEGAPIE-Project で液体 Pb-Bi ターゲットを開発している。

(2) LANSCE

LANL の加速器は、2 種類のイオン源を持ち H⁺ と H⁻ イオンの 2 種類を加速することができる。加速エネルギーは、800MeV である。加速ビームは、2 つに分けられ一つは Isotope production Facility で RI 製造に、もう一つはストレージリングを經由して中性子源施設に送られる。中性子源施設は、Lujan Center (Lujan Neutron Scattering Center) と WNR (Weapons

Neutron Research Facility) がある。

(3) SNS

Oak Ridge の加速器は、常電導線形加速器と超伝導加速器の組み合わせであり、H⁻イオンビームを 1GeV まで加速し、それをストリッパで H⁺イオンにして、ストレージリングで 1 μ s のパルスビームにバンチする。取り出されるビームは、60Hz で 1.4mA、1GeV で 1.4MW の出力を持つ。SNS は 2006 年に稼働する予定である。

(4) J-PARC

J-PARC は、高エネルギー加速器研究機構と原研が共同で建設している研究施設で、主に高エネルギー物理と物質・生命科学、原子力工学の研究施設である。加速器は、400MeV 常伝導線形加速器とそれに続く 3GeV と 50GeV のシンクロトロンで構成される。2007 年には、200MeV までの常電導線形加速器とシンクロトロンを完成させ、運用を開始する予定である。物質・生命科学のための中性子源には最大で 1MW (3GeV, 333 μ A) のビームを投入できる。なお、残り 200MeV の常電導線形加速器と ADS 実験施設の建設は、2nd フェーズに行われる予定である。

3.2 ADS

ADS は、大強度加速器で得られるイオンビームをターゲットに当て、生成する中性子で核燃料を燃焼させるシステムである。その特徴は、ターゲットと燃料が分離されているので、種となる中性子強度を加速器でコントロールできることである。発電を主目的とした Energy Amplifier (EA) System や、Pu や、MA などの長寿命核廃棄物の減量用原子炉として提案されている。

EU では、RED-IMPACT と呼ばれるプロジェクトが進められている。このプロジェクトは、長寿命核廃棄物減少のための分離変換技術を最終処分に導入することによる経済、環境、社会などへのインパクトを評価するものである。

ADS の実験では、アイダホ州立大 Idaho Accelerator Center (IAC) の Reactor-Accelerator Coupling Experiments (RACE) プロジェクトが紹介された。RACE プロジェクトは、アメリカエネルギー省の原子力科学技術局 (the Office of Nuclear Energy, Science, and Technology of the U.S. Department of Energy) による Advanced Fuel Cycle Initiative (AFCI) プロジェクトの一つである。AFCI プロジェクトは使用済み核燃料の再利用及び核毒性の減少技術の開発を目指すもので、その一つに加速器を用いた核変換技術がある。RACE では、加速器と重金属ターゲットを使い、未臨界原子炉システムの研究を行う。このプロジェクトで用いる加速器は、25MeV の電子線形加速器 (電流量: 80~100mA、パルス幅: 2~5 μ s、繰り返し: 0~100Hz) で、未臨界実験炉は W-Cu ターゲットを中心に配し、

その周りを 150 個の U-Al 燃料、さらにその周囲を水モデレーターとグラファイト反射壁で囲っている。

3.3 加速器技術

大強度加速器の開発も重要な課題であり、総合講演に取り上げられた。

ヨーロッパでは CARE (Coordinated Accelerator Research in Europe) プロジェクトが進められている。このプロジェクトは、高エネルギー物理研究を目指し、加速器の開発に必要な要素技術を明らかにし、その開発を行うというものである。

京大原子炉実験所では FFAG (Fixed Field Alternating Gradient ; 固定磁場強収束) 加速器を建設中である。FFAG は、サイクロトロンとシンクロトロンそれぞれの長所を兼ね備え、これまでの加速器では不可能だった大電流でかつ速い繰返しが可能という優れた特徴をもつ。その一方で、加速器の磁場が非常に複雑であるため、KEK で陽子用 FFAG 加速器が建設されるまで、イオン加速用の FFAG は実現されていなかった。京大原子炉実験所で建設している FFAG は、ADS 開発のための実験に使われる予定である。

3.4 シミュレーション

高エネルギーの核反応シミュレーションは、核破砕中性子源、ADS、医療、天体における元素合成、その他の応用などに用いられている。高エネルギー粒子が減速されつつカスケード反応を起こすので、計算コードは、核分裂、核子の蒸発、フェルミ break-up、多重破砕など様々な反応を網羅して取り込む必要がある。

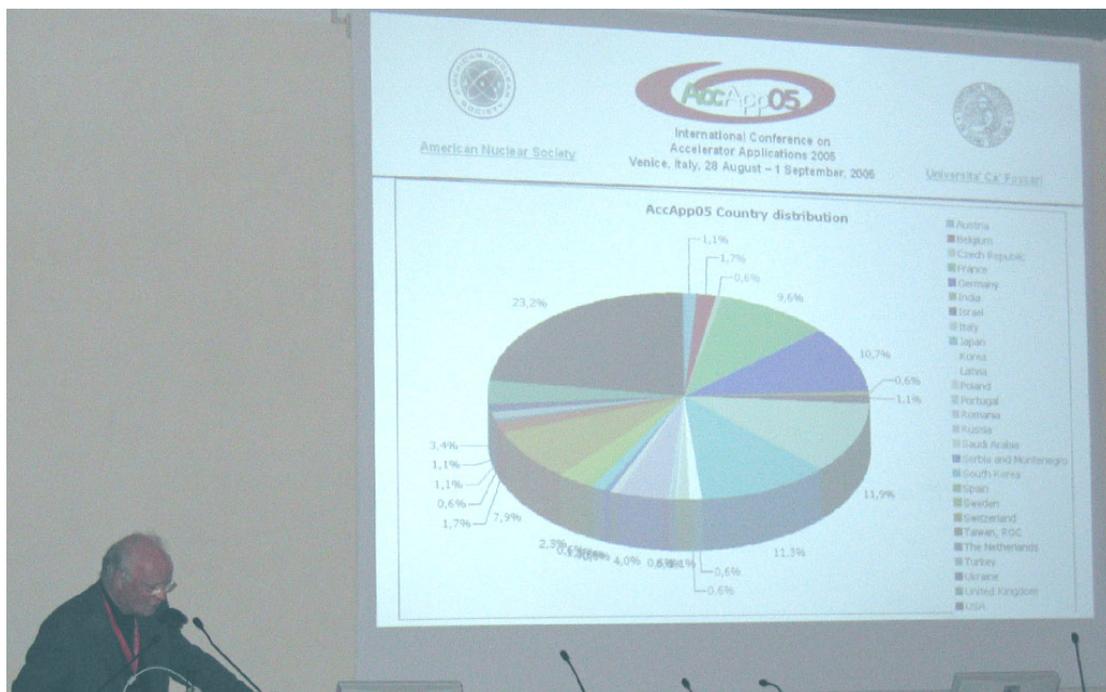
講演では、LANL で開発した MCNPX 2.5.0 (Monte Carlo N-Particle eXtended radiation transport code) が紹介された。34 種類の粒子で、1 TeV のエネルギーまでシミュレートできる様に旧バージョンから拡張されている。

3.5 不安定核ビーム用ターゲット

講演で異色だったのは、Michigan State Univ. の G. Bollen による講演で、RIA (Rare Isotope Accelerator) 計画の説明がなされた。RIA は、大強度加速器を用い地球上に存在しない極微量の不安定核を生成し、それを研究する計画である。アメリカエネルギー省における未来科学を担う研究施設 (Facilities for the Future of Science – A 20- year Outlook) の第 3 番目にランク付けされている (第 3 位のプロジェクトは、他にも 2 つある)。不安定核の研究では、反応断面積の小さな核を生成する必要があるため、大強度ビームは不可欠であり、これに耐えられるターゲットの開発が重要なポイントになっている。RIA 計画では、重イオンビームをターゲットに当て核破砕反応させ、そのまま質量分析器で分離する「入射核破砕片分離装置」と、ターゲットに大強度ビームを当て、反応生成物をイオン化して分離する「オンライン同位体分析器 (Isotope Separator On-Line (ISOL))」の 2 種類を併

設する予定である。

日本では、理研が RI ビームファクトリーで入射核破砕片分離装置を建設中であるが、大強度加速器につながった ISOL 型の不安定核分離装置の建設は現在計画されていない。J-PARC に ISOL 型装置を設置する計画が認められなかったのは、非常に残念である。



会議風景。Prof. D. Filges による閉会の挨拶。スクリーンは参加者の国別の統計である。

4. おわりに

本会議に参加して、大強度加速器による中性子源の応用が始まりつつあり、ターゲットなどの開発が精力的に行われていることがわかった。それに伴い、システム設計に必要な中性子やイオンビームなどの高エネルギー粒子の高精度な核反応データの需要が高まっていると感じた。実際に、そのような核データ取得実験や実験とシミュレーションとの突合せも報告されている。ADS や高強度中性子源を実用化するためには、システム設計に必要な核データのみを取得するのみでなく、広い範囲で高精度な核データを系統的に取得するとともに、ターゲットやその周囲の壁面の放射化をシミュレートする技術（計算コード）の整備が必要となってくるであろう。

5. 謝辞

著者の AccApp05 への参加は、文部科学省「革新的原子力システム技術開発公募事業」で採択されたテーマ「高度放射線測定技術による革新炉用原子核データに関する研究開発」によるものである。

付録 会議プログラムの概要 (パラレルセッションを除く)

Opening Remarks

29 日 (月)

- D. Filges, Forschungszentrum Juelich
Welcome and Agenda
- F. Carsughi, Forschungszentrum Juelich,
Università Politecnica delle Marche
Organisation Details

Plenary Session

29 日 (月)

- W. Wagner, PSI, Switzerland
Status of SINQ: The only MW Spallation
Neutron Source, Highlighting Target
Development and Industrial Applications
(invited)
- P. Lisowski, LANL, USA
The Los Alamos Neutron Science Center
(invited)
- Y. Kadi, CERN, Switzerland
Energy Amplifier Systems: Simulation and
Experiments in the Field (invited)
- L. K. Mansur, ORNL, USA
Materials Issues in High Power
Accelerators (invited)

30 日 (火)

- T. Mason, ORNL, USA
The Spallation Neutron Source: A Powerful
Tool for Materials Research (invited)
- Y. Oyama, JAERI, Japan
J-PARC and New Era of Science (invited)
- M. Salvatores, CEA, France
Fuel Cycle Strategies for the Sustainable

Development of Nuclear Energy: the Role
of Accelerator Driven Systems (invited)

- O. Napoly, CEA/Saclay, France
The CARE Program (Coordinated
Accelerator Research in Europe) (invited)
- Y. Mori, KEK / Univ. Kyoto, Japan
Developments of FFAG Accelerators and
their Applications (invited)

31 日 (水)

- D. Beller, Idaho Accelerator Center, Idaho
State Univ., USA
The U.S. AFCI Reactor-Accelerator
Coupling Experiments (RACE) Project
(invited)
- A. Gessi, ENEA, Italy
Technology Challenges in ADS
Sub-Critical Systems Development
(invited)
- W. Gudowski, KTH, Sweden
Red-Impact - Assessing Impact of
Transmutation Technologies on Geological
Repository of Nuclear Waste (invited)

- Plenary - Special

Dedicated High Powered Target Test Facilities

- G. Bollen, Michigan State Univ., USA
The Rare Isotope Accelerator Project –
Concept and Target Issues (invited)
- B.W. Riemer, T. A. Gabriel, J. R. Haines, T. J.
McManamy, ORNL, USA
Requirements for a High Power Target Test

Facility (key talk)

- M. Cappiello, R. Wood, E. Pitcher, B. Bergman, LANL, USA
LANSCE Materials Test Station for Fast Neutron Irradiations
- J. R. J. Bennett, Rutherford Lab., CCLR., UK
Some Problems Encountered with High Power Targets with Special Reference to Neutrino Factories
- P. T. Spampinato, V. B. Graves, T. A. Gabriel, H. Kirk, N. Simos, T. Tsang, K. McDonald, P. Titus, A. Fabich, H. Haseroth, J. Lettry, ORNL, BNL, Princeton Univ., MIT, CERN
A Free Jet Hg Target Operating in a High Magnetic Field Intersecting a High Power Proton Beam

9月1日(木)

- S. Mashnik, LANL, USA
A Review of Models and Codes for

Spallation Sources, Accelerator Driven Systems, and other Applications (invited)

- J. Hendricks, LANL, USA
The Current Status of MCNPX (invited)

Conference Summary

- Sylvie Leray, CEA, France
Models, Experiments –new models/ codes/ nuclear data
- Louis K. Mansur, ORNL, USA
Material Issues -window materials/ pressure waves
- John Carpenter, ANL, USA
Accelerator Applications –spallation sources
- Waclaw Gudowski, KTH, Sweden
Accelerator Applications – transmutation/ future project