

## 原子力歴史構築賞

### (5) 原子力の基礎研究を推進した世界最大級の タンデム加速器

日本原子力研究開発機構

竹内 未広

takeuchi.suehiro@jaea.go.jp

千葉 敏

chiba.satoshi@jaea.go.jp

永目 諭一郎

nagame.yuichiro@jaea.go.jp

標記表題で原子力科学研究所のタンデム加速器が日本原子力学会の「原子力歴史構築賞」を受賞した。本解説は、その推薦理由の内容を基にしたものであるが、タンデム加速器における核データ測定活動に関して少し詳しく述べている。

#### 1. タンデム加速器の発展

静電型加速器は、エネルギーが連続可変で、様々なイオン種を加速することができる点で、利用範囲の広い優れた加速器である。旧日本原子力研究所では（以下、原研）、原子力の基礎となる核データ、核物理、核化学、照射効果、材料物性、原子分子などの研究を推進するため、わが国最初のバンデグラフ型加速器 2MV バンデグラフに続き 5.5MV バンデグラフ加速器を建設した。これらの加速器では、わが国における原子力の草分け的な原子力基礎研究が行われた。

1982年、さらなる研究の推進のために、世界最大級の静電型加速器である 20MV タンデム加速器をもつ加速器施設を完成させた。利用施設としては、5つのターゲット室に合計 13本のビームラインが配置され、大・中・小の合計約 18の各種実験装置が装備された（図1）。

タンデム加速器では、水素からビスマス

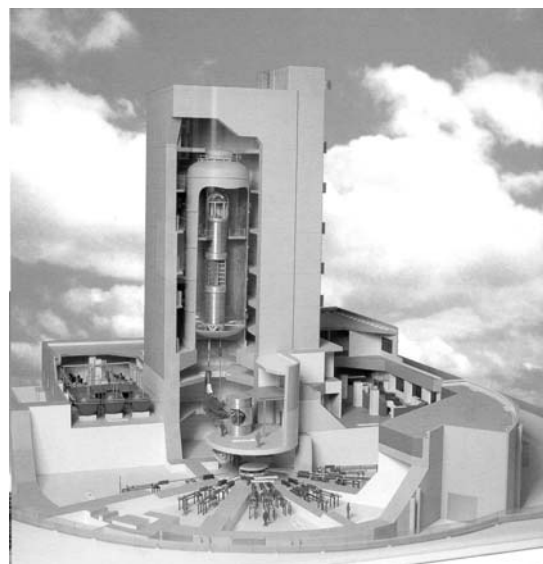


図1 タンデム加速器施設の展示モデル  
(1982年当時の状況)

までのほぼ全ての元素が加速可能であり、初期には核融合炉開発のための 5~14MeV 中性子の核データ測定や核融合炉壁材料の照射損傷研究を実施した。また、原研の特徴を活かし、核燃料・アクチノイド標的を安全に取扱うことのできる国内唯一の加速器施設として多くの原子力基礎研究を推進してきた。

1984 年からは、タンデム加速器で加速した重イオンをさらに加速するため、超伝導加速空洞を開発し、40 空洞（4 空洞を収納するクライオスタット 10 基）からなる超伝導ブースター（後段加速器）を 1994 年に完成させ（図 2）、全ての元素イオンによる核



図 2. 超伝導ブースター

反応が可能な研究施設へと発展させた（因みに、開発した超伝導加速空洞は、1/4 波長の同軸線型のニオブ製共振空洞で、飛躍的な加速電界の向上をもたらした）。

2001 年からは、高エネルギー加速器研究機構（KEK）一田無が開発した「短寿命核加速実験装置」を中性子核データ測定の任務を終えた中性子ターゲット室に移設する工事を KEK と共同で行い、タンデム加速器からの一次ビームで生成した放射性核種のイオンビームを再加速する装置 TRIAC（Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex）を 2005 年に完成させ、放射性核種のビーム利用を開始した。

1998 年から既に、多価イオンを発生できる小型の永久磁石製電子サイクロトロン共鳴型（ECR）イオン源を加速器の高電圧端子に装着し希ガスイオンビームを実験に提供し好評を得ていたが、大改造を経て 2008 年に本格的な高性能 ECR イオン源を装着し、静電加速器としては世界最大級のエネルギーと強度をもつイオンビームの生成に成功した。以上のようにタンデム加速器施設は、継続的な加速器開発により、イオンビームを用いる原子力基礎研究を常に先導する加速器複合施設として発展を続けてきた。

利用においては、日本における重イオンビームを用いた核物理、核化学、照射効果、材料物性、原子分子など幅広い原子力基礎研究の中心施設として、研究利用の約 80%を大学・研究所等、原子力機構外部との共同研究で行っており、年間の利用者数は 200 人に上る。加速器運転時間は 1982 年のビーム供与開始以来、年平均 5,000 時間の運転時間を維持し続けてきており、実質的なビーム利用時間の積算は 10 万時間を既に達成している。研究成果の発表は専門誌への論文掲載が年平均 70 報、国際会議等での研究発表が年平均 90 件である。これまでに加速器を用いた研究により修士 43 名、博士 35 名を輩出し人材育成にも役立ってきた。

## 2. 核データ測定と核データへの貢献

タンデム加速器中性子ターゲット室（現在 TRIAC の加速実験室）には、かつては2本のビームラインが有り、ひとつには回転半径 7m の中性子散乱 TOF スペクトロメータ（図 3）、もう一本のラインにはコンプトン抑止型 NaI(Tl)検出器が設置され、主として核融合炉開発に関連するエネルギーでの中性子断面積測定が行われた。中性子源としては、 $D(d,n)^3\text{He}$  反応、 $^7\text{Li}(p,n)$ 反応の他に、 $^1\text{H}(^{11}\text{B},n)^{11}\text{C}$  反応が優れた中性子源であることが本施設により発見された。

TOF スペクトロメータでは、 $D(d,n)^3\text{He}$  反応により 11~13、18MeV の中性子を発生し、 $^{27}\text{Al}$ 、 $^{118}\text{Sn}$ 、 $^7\text{Li}$  等の中性子散乱断面積、また後期には  $^7\text{Li}(p,n)$ 反応で 28MeV の中性子を発生して  $^{12}\text{C}$  の中性子散乱断面積の測定が行われた。特に  $^{12}\text{C}(n,n)$ 、 $(n,n')$ 反応の測定結果は、当時、主としてアクチノイド領域核種に適用されていた軟回転体チャンネル結合模型との詳細な比較が行われ、このモデルが軽核領域でも有効であることを初めて示した。この成果により、同模型はその後中性子核データの評価、特に JENDL 高エネルギーファイルや JENDL-4 の評価に用いられる標準的な手法として確立した。軟回転体模型により核構造を記述するパラメータの系統性も見いだされ、核データの予測手法としてユニークな地位を確立した。

核融合炉開発上重要な 7~13MeV のエネルギー領域は単色の中性子を発生することが困難なため実験データが極端に少なく、“ギャップ”領域と呼ばれている。タンデム加速器では、その特徴である重イオン ( $^{11}\text{B}$ ) を加速し水素ターゲットに照射することで、この領域で非常に単色性の良い中性子を発生できることを見いだした。この中性子源を用いて、核融合炉材料、ドジメトリイ反応などの放射化断面積の測定が多数行われた。

コンプトン抑止型 NaI 検出器では、 $D(d,n)^3\text{He}$  反応を中性子源として 7~13MeV 領域の中性子を発生し、核融合炉構造材料からの即発ガンマ線生成断面積の測定が行われた。この測定では TOF により中性子源から発生するブレイクアップ中性子の寄与を弁別した。

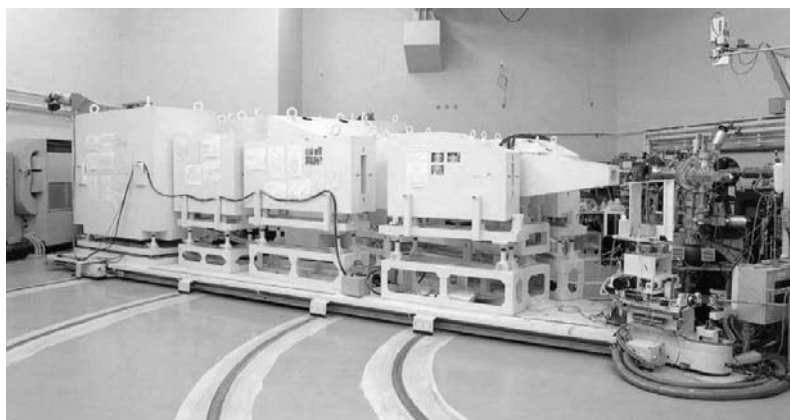


図 3. 在りし日の中性子散乱 TOF スペクトロメータ

（このスペクトロメータがあった旧中性子ターゲット室は増改築され、放射性イオンビーム加速実験装置（TRIAC）が設置されている）

これら一連の成果は、JENDL-3 及びそれ以降の核データ評価の際に考慮され、核データの精度向上に大きな貢献した。

### 3. 核物理・核化学分野の研究成果

重イオン核物理分野においては、不安定核の核構造研究、重イオン核融合や核分裂などの核反応機構研究を進めてきた。標的の変形度と重イオン核融合確率の関係や、超重元素合成に向けた融合障壁の測定などで成果を収めた。またクーロン励起を用いて種々核種のインビーム  $\gamma$  線核分光研究を行った。一方、重イオン核子移行反応を利用した  $\gamma$  線測定では、 $^{240,242}\text{U}$ ,  $^{245,246}\text{Pu}$ ,  $^{249,250}\text{Cm}$  など中性子過剰なアクチノイド核の励起準位構造を初めて明らかにし、原子核の変形に関わる核データの取得に貢献した。この実験手法は、次世代高速炉で必要とされるキュリウムなどの中性子核データを導出するための代理反応法として期待が寄せられている。

核化学分野においては、アクチノイドの低エネルギー核分裂機構に関する研究ならびにオンライン同位体分離器を用いた新核種の探索などで大きな成果を得てきた。特に核分裂における 2 種類の核分裂経路の実験的検証や、希土類ならびにアクチノイド領域における 17 種の新核種の発見は世界に誇れる成果である。最近は原子番号で 100 を超える領域の重元素を合成し、生成断面積の測定やそれら元素の化学的、核的性質の研究に精力的に取り組んでいる。なかでもシングルアトムを対象にした 104 番元素ラザホージウムの研究では、水溶液中での化学種を初めて決定するなどの成果を収めた。なお、新核種探索関連では 2000 年に日本放射化学会奨励賞を、ラザホージウムの研究では 2004 年に、核分裂研究では 2007 年に、それぞれ日本放射化学会賞を受賞した。

オンライン同位体分離器を用いて発見された新核種は以下の通りである。 $^{121}\text{La}$ ,  $^{159}\text{Pm}$ ,  $^{161,162}\text{Sm}$ ,  $^{163,164,165,166}\text{Eu}$ ,  $^{165,166}\text{Gd}$ ,  $^{166,167,168}\text{Tb}$ ,  $^{233,236}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Cm}$ ,  $^{241}\text{Bk}$ 。ここで中性子過剰な希土類領域の新核種は  $^{238}\text{U}$  の陽子誘起核分裂で、また中性子欠損領域の新アクチノイド核種は  $^{233,235}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  標的に  $^6\text{Li}$  イオンを照射して合成された。

### 4. 固体物理・照射効果分野の研究成果

照射損傷研究から発展した研究としては、重イオンによる照射効果において電子励起が極めて重要な役割を持つことを発見し、電子励起に着目した重イオン照射効果の研究を進展させた。特に、高燃焼軽水炉燃料における核分裂片による電子励起効果の重要性を明らかにした。固体物理研究としては、酸化物高温超電導体の臨界電流密度の改善と磁束のピン止め機構の相関を明らかにするなどの成果をあげた。

原子分子物理の研究では、核融合のプラズマ計測、プラズマモデリングなどの原子分子データとして重要な電荷移動過程などの原子衝突過程データが測定された。特にタンデムからの多価イオンから放出される光子・電子測定による多価イオン構造の系統的研究に多くの成果を挙げた。