

宇宙に存在する鉄よりも重い元素の大半は、中性子捕獲過程により生成された。特にウラン・トリウム等の重元素までの生成は、過剰な中性子環境下における爆発的元素合成：速い中性子捕獲(r -)過程により生成されたとされているが、その起源となる天体は現在も特定されておらず、今世紀に残された基礎科学上の謎一つである。

起源天体の解明には、天体観測のみならず r -過程に関与する未知原子核の研究を通じた、超新星爆発や中性子星衝突などの爆発的天体現象の理解が鍵を握っている。我々グループの中心的プロジェクト KISS(KEK Isotope Separation System)では、 r -過程で生成される元素存在比のなかで、実験的制限のためこれまで着手されてこなかった第3存在比ピークの起源核である中性子数($N=$)126、質量数($A=$)195 周辺の中性子過剰未知重原子核の性質を調べ、起源天体の r -過程環境を特定しようとしている。この領域は理化学研究所 RIBF 施設では到達が難しいと考えられており、両者の推進によって r -過程に関与する未知原子核の広汎な研究が進むものと期待されている。また本グループでは、加速された短寿命核分離加速実験装置 TRIAC (Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex)の経験を元に、低エネルギー短寿命核ビームによる関連する天体核の実験的研究、核構造研究、物質科学への応用研究等を手がけている。

1. KISS 計画進捗状況

KISS 計画は、2011 年度より、理化学研究所仁科加速器センターにおける装置本体の建設が始まり、2013 年度から、加速器からのビームを用いたオンライン性能試験を行っている。ここでは、装置の概要と現状についての報告を行う。

未知の中性子過剰重原子核探索を目指す KISS は、核反応生成物を捕獲した後中性原子化するためのガスセル、特定元素のみをイオン化するための共鳴イオン化用レーザー、オンライン型の質量分析器からなる、最新の元素選択型質量分析器である (図 1 参照)。未知原子核生成には、中性子過剰な重イオンビームによる多核子移行反応を用いている。2010 年の KISS プロジェクト発表以来、フランス、ロシア等で同様の装置の建設と研究が追随している。

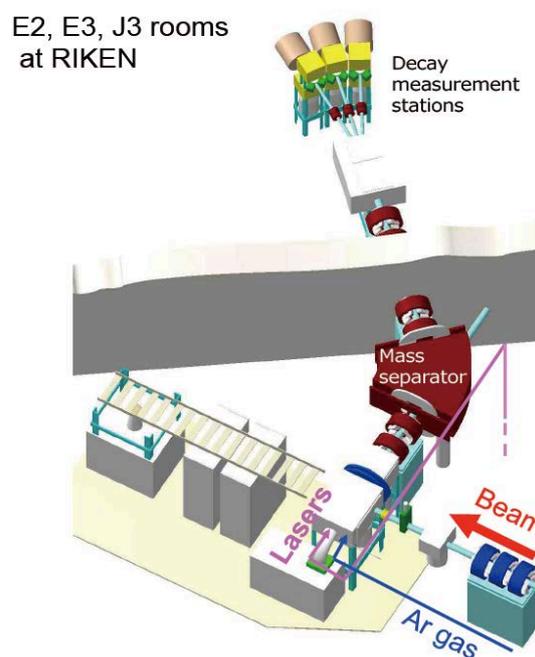


図 1 KISS 装置の概念図

2013年9月に同年3月に引き続き、理研サイクロトロンから供給された核子当たり90 MeVの ^{56}Fe ビームを核子当たり1.5 MeVに減速してガスセルに打ち込み、2段階レーザー共鳴イオン化法で鉄のみをイオン化、20 kVで引き出す実験を行った。前回の実験ではビーム強度を増やすと引出し効率が下がる現象が確認されたため、ビーム照射によって生じるプラズマの影響を受けないようガスセル引出し部分の構造を変更している。

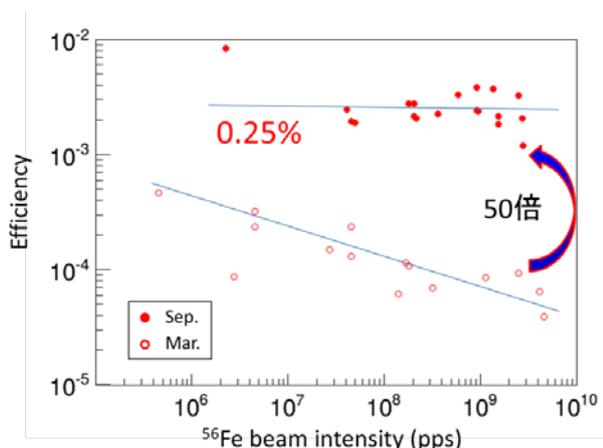


図2 ^{56}Fe の引出し効率の入射ビーム強度依存性

図2に測定結果を示した。Closed circle、Open circleはそれぞれ9月および前回3月の実験結果で、ビーム強度依存性がなく、引出し効率は0.25%と約50倍向上した事を確認できた。また元素選択率（質量数56のイオンピーク中の鉄イオンとバックグラウンドの比）も100倍に向上し、引き出した鉄ビーム純度は99%になった。レーザー照射時に観測された水和物($^{56}\text{FeH}_2\text{O}$)あるいはアルゴン分子と結合した鉄イオン($^{56}\text{FeAr}_2$)は、共鳴イオン化後に生成された分子イオンである事から、ガス中の水分子やアルゴン分子濃度を低減させる事で、既存レーザー強度による限界はあるが、鉄単体イオンの効率向上が望める(図3参照)。

本実験によってKISSの基本的性能が得られたので、12月3-4日のオンライン試験では、 ^{124}Xe ビームにより弾性散乱された ^{198}Pt 等を引出して、より本実験に近い条件での効率や純度の調査を行った。白金元素の共鳴イオン化によって、単体の ^{198}Pt イオン、 $^{198}\text{PtH}_2\text{O}$ 、 $^{198}\text{Ar}_2$ イオン等の検出に成功した。ビームをパルス化して、それぞれのイオンの引出し時間分布も測定できており、今後のイオンの輸送状況の解析などから、さらにイオン化効率を上げるための改善点を特定する。

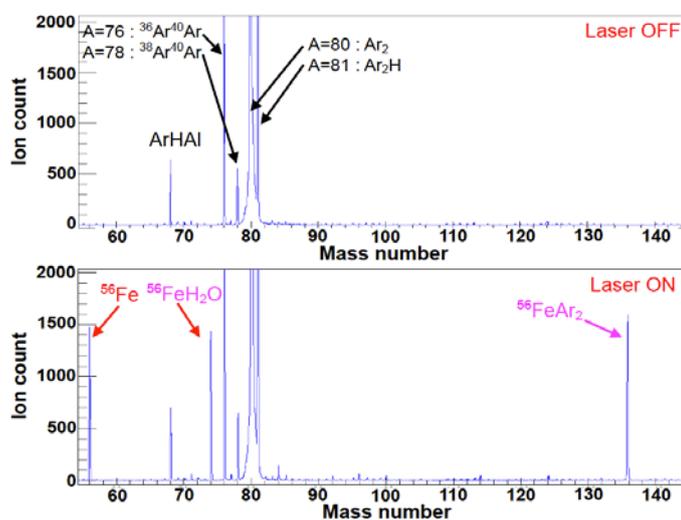


図3 レーザーon/off時のイオン質量スペクトル

2. リチウム電池材料中でのリチウムのナノメータ拡散現象の観測

エネルギーの良く揃った短寿命リチウム同位体(^8Li , 半減期 0.8 秒) を物質中に打ち込み、

ベータ崩壊後に放出される α 粒子の時間分布を調べる事で、非破壊的にリチウムの物質中拡散を調べることができる。この手法は、東海キャンパスに設置されていた TRIAC において開発された画期的手法である。これまでの測定法では、 $0.1 \mu\text{m}/\text{sec}$ 程度の拡散現象が観測限界であったが、さらに低エネルギー(10 keV 程度)のリチウムイオンの打込みによって、ナノメータ領域の拡散現象を調べられるようになった。この手法は、リチウム電池の電極物質と電解質間の移動現象等を調べる上で有力なプローブとなり得る。

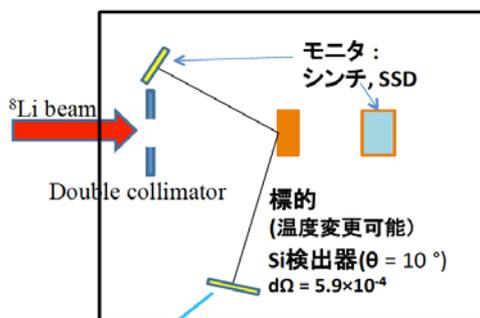


図4 拡散測定セットアップ

図4に示すように測定のセットアップは極めてシンプルで、物質内を通過する距離に応じて検出される α 粒子のエネルギーが減衰する事を利用し、その検出強度の時間変化から拡散速度を導く。

10月に JAEA タンデム加速器施設にて、リチウム電池電解質の一つである $\text{Li}_2\text{O}-\text{V}_2\text{O}_5-\text{SiO}_2$ (LVSO と呼ばれる) 試料による実験を行った。図5は100度に設定した試料中に、1.5秒間打込んだ ^8Li からの α 粒子検出強度の時間スペクトルを示している (^8Li の半減期で規格化している)。アルファ粒子は、1.6MeV を中心に広がりのあるエネルギー分布で放出される事が知られており、図中の赤点が、1.6MeV よりも低いエネルギー領域、青点が高い領域の時間分布である。時間変化はフィックの法則を用いた拡散シミュレーションとの比較解析から、 $10^{11}\text{cm}^2/\text{sec}$ 程度の拡散係数を示している (図中の緑および紫の実線) 事が確認できた。本手法で $10^{12}\text{cm}^2/\text{sec}$ 程度までの遅い拡散現象を明らかにできると期待している。結果は間もなく論文発表の予定。

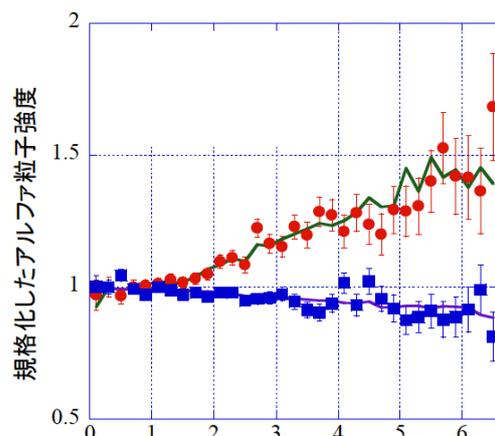


図5 アルファ粒子強度の時間分布。緑および紫の実線は、観測値を最も良く再現するシミュレーション結果($D=1.1 \times 10^{11} \text{cm}^2/\text{sec}$)。

3. 第12回物質の起源と銀河の進化に関する国際シンポジウム(OMEG12)の開催

11月18日から22日にかけて、つくば国際会議場 (EPOCAL)において、KEK が主催して OMEG12 シンポジウムを開催した。共催機関は東京大学原子核研究センター、中国原子能研究所(CIAE)、国立天文台、韓国 Institute for Basic Science (IBS)、大阪大学核物理研究センター、理化学研究所仁科センター、東北大学、筑波大学で、新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」、日本万国博覧会機構からの財政援助を受けた。1988年から2年ごとに開かれているこのシンポジウムは、原子核実験を中心に宇宙物理、天体

観測、隕石分析、原子核理論などの
広汎な研究分野からの研究者が一堂
に会して、おもに物質の起源に対す
る研究の進展、新たな観測結果を多
角的な視点から議論できるユニーク
な機会となっている。ポスター発表
についての **short oral presentation**
が特別に設けられており、若手研究
者の啓発の機会にもなっている。

今回の参加者は、15 カ国からの
116 名で、各分野の中堅研究者によ
る招待講演 (31)を中心に、21 の口

頭発表、47 件のポスター発表が行われ、活発な議論を行うことができた。会期中に開かれ
た市民講座 [The Cosmos and Element Genesis]では、シンポ参加者も加わって、Planck
衛星観測の最新結果と Big Bang Nucleo-synthesis を中心としたレビュー講演が持たれ、盛
況であった。次回 2 年後の主催者は、中国 CIAE(Chair: Dr. Weiping Liu)。



図6 OMEG12 参加者集合写真