

平成17年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

ふりがな（ローマ字）		SAGARA KENSHI					
①研究代表者氏名		相良 建至		②所属研究機関・部局・職 九州大学・大学院理学研究院・教授			
③研究課題名	和文	天体核融合反応断面積の直接測定					
	英文	Direct measurement of cross section of nuclear fusion reactions in stars					
④研究経費		平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	総合計
17年度以降は内約額 金額単位：千円		28,900	23,700	24,000	5,800	5,900	88,300
⑤研究組織（研究代表者及び研究分担者）							
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）				
相良 建至	九州大学・大学院理学研究院・教授	実験核物理学	総括、装置設計開発、測定				
野呂 哲夫	九州大学・大学院理学研究院・教授	実験核物理学	粒子軌道計算、データ収集系整備				
森川 恒安	九州大学・大学院理学研究院・助手	実験核物理学	データ収集系整備、測定				
池田 伸夫	九州大学・大学院工学研究院・教授	原子核工学	測定、データ解析				
御手洗 志郎	九州大学・大学院理学研究院・助手	実験核物理学	イオン源改造、タンデム加速器運転・保守				
寺西 高	九州大学・大学院理学研究院・助教授	実験核物理学	装置設計開発、測定、データ解析				
⑥当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）							
<p>本研究の主目的は、天体が超新星爆発に進むか赤色矮星になるかを決め、宇宙でのタンパク質合成に影響するC/O比を左右する天体核反応${}^4\text{He}+{}^{12}\text{C}\rightarrow{}^{16}\text{O}+\gamma$の反応断面積を測定することにある。このC+$\alpha$天体核反応の起こる$E_{\text{cm}}=300\text{keV}$付近では${}^{16}\text{O}$の準位構造のために断面積（S-factor）が大きく変化するので、本研究では$E_{\text{cm}}=3.0\text{MeV}$付近から700keVまでの断面積を10%以下の精度で実測して外挿する。しかしクーロン障壁のために断面積は700keVで約1 pbarnと極めて小さく、それ故35年間世界で成功していない。</p> <p>（1）検出数を増やすためにビーム強度、ターゲット厚、検出効率を限界まで増強する必要がある。これまでの多数の独自アイデアにより検出数増加案は出来ており本研究で実行する。</p> <p>（2）我々の測定計画では700keVでの${}^{16}\text{O}$の検出数は1日4個程度であり（競争相手の独グループの計画も同様）、反応生成物の${}^{16}\text{O}$とビームの${}^{12}\text{C}$の個数比は10^{-18}である。本研究開始時に10^{-14}であったバックグラウンド(BG)を、独自アイデアを発揮して5桁低減し、10^{-19}以下のレベルにする。</p> <p>（3）断面積を10%の精度で測定する。（1）と（2）で統計精度を上げる一方、様々な較正実験をして系統誤差を低減する。</p> <p>${}^4\text{He}+{}^{12}\text{C}\rightarrow{}^{16}\text{O}+\gamma$反応断面積を測定後に、開発した独自技術を他の天体核反応測定に応用する。</p>							

⑦これまでの研究経過 (研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。)

本研究の第一目的は、 ${}^4\text{He}+{}^{12}\text{C}\rightarrow{}^{16}\text{O}+\gamma$ 反応の断面積を $E_{\text{cm}}=2.4\text{MeV}$ から 0.7MeV まで測定すること、それを外挿して天体反応が起こる $E_{\text{cm}}=0.3\text{MeV}$ での断面積を評価することにある。そのために検出量増加、バックグラウンド(以下BG)低減、断面積絶対値評価が必要であり、新装置開発、加速器改造、絶対値評価のための較正実験、測定安定化が必要である。本研究開始前は、検出量増加案はあったが実行されてなく、BG低減は5桁不足しており、絶対値評価のための実験も出来ていなかった。BGの5桁低減が最大の難関だった。

本研究開始直前に、BG低減に効果がありそうな長時間チョッパー(以下LTC)を思いついたが電源を製作保証できる業者はいなかった。やむなく、保証なしの共同開発と言う条件で業者に依頼した。発振コイルを九大で自家製し、テフロン製真空パッキンを新案して誘電発熱を抑えてLTCを開発した。またBG発生源の一つであった小口径電磁石レンズを1年目に大口径に改造した。真空中に膜なしでヘリウムガスを閉じ込める特殊標的を高密度化するために冷却する準備研究も行った。

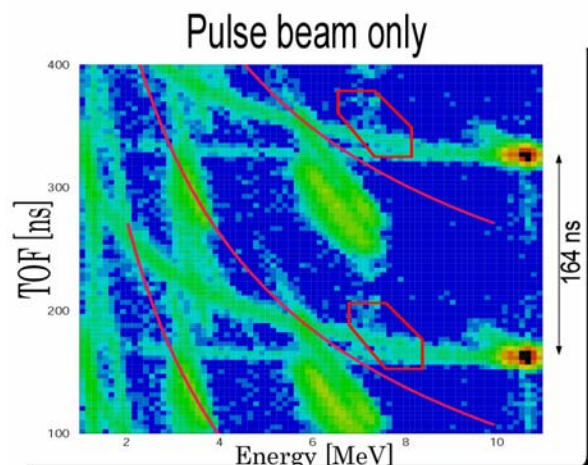
2年目早々のテスト実験で、LTCはBGを3桁低減し、 $E_{\text{cm}}=2.4\text{MeV}$ でBGフリーのきれいなデータが得られた(下図)。実に大きな進展であった。この実験でBGをあと1桁以上低減する方法も考案できた。

この成果を2004年7月のバンクーバーでの国際会議で発表した。競争相手の独グループ実験が最も進んでいたが、最終目標に我々が先着する可能性がある。研究代表者の相良は当時物理学科長であり大学院入試他のためにこの国際会議に出席できなかったのは残念だった。研究分担者の寺西他が発表した。

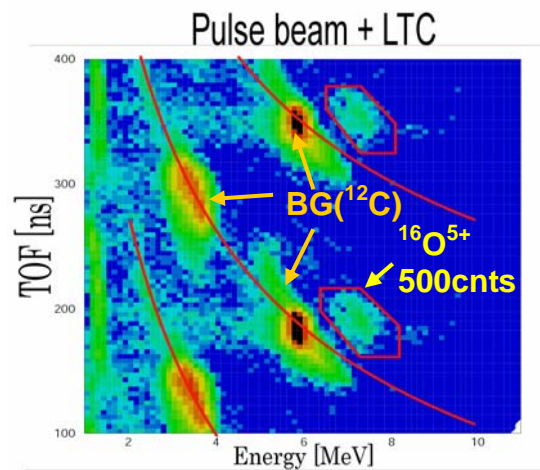
2年目には、ビームパルス化効率を現在の10%程度から95%に高めるために、イオン源で前段バンチする鋸歯状波電源を開発しイオン源の大幅配置換えに着手した。また九大の10MVタンデムを1MVタンデム(小型タンデム)として使うための加速減速方式は既に相良他によって考案されていたが、実際に強力ビームの加速テストを行った結果、加速電圧制御系を強化することにした。断面積絶対値を評価するために反跳粒子分析装置の立体角を測定し、 ${}^{16}\text{O}$ の荷電分布測定のための装置も製作した。気体標的を炭素薄膜($10\mu\text{g}/\text{cm}^2$)で作る試みも行った。検出量増加、絶対値評価、測定安定化を進展させた。

現在 ${}^4\text{He}+{}^{12}\text{C}\rightarrow{}^{16}\text{O}+\gamma$ 反応断面積測定は、独ルール大学のRolf教授率いるグループ、カナダTRIUMFグループ、九大グループが競争している。2004年7月段階で、 $E_{\text{cm}}=5.2\text{MeV}$ で測定した独Gが先行し、 $E_{\text{cm}}=2.4\text{MeV}$ で測定した九大Gが続いている。両Gとも最終目標は $E_{\text{cm}}=0.7\text{MeV}$ での測定である。ドイツGは粒子識別(現在 $\Delta E\cdot E$)のために新たに飛行時間測定をする必要があり、九大Gではあと2桁のBG低減が必要だが削減案はある。どちらが先着するか判らないが、両Gとも数年内に最終データを得て35年間の世界競争を終わらせるだろう。2グループから実験データが出ることは信頼性の点で望ましい。

(左) 長時間チョッパー稼働前。
 ${}^{16}\text{O}$ の領域はBGで埋もれている。



(右) 長時間チョッパー稼働後。
 ${}^{16}\text{O}$ がBGなしの孤島状態で検出された。



⑧特記事項 (これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

長時間チョッパーの開発

本研究で考案し開発した長時間チョッパー (LTC) は、時間幅を持つ反応生成粒子を偏向電圧ゼロで通過させ、それ以外の時間に高電圧で粒子を偏向して除去する装置である。反応生成粒子と同時に通過したバックグラウンド (以下 BG) 粒子は、LTC～検出器間の飛行時間で反応生成粒子と区別される。

このLTCは、本実験のBG除去に威力を発揮した。ビーム粒子数に対して 10^{-14} のBGレベルを 10^{-17} に低減した。テスト実験では 10^{-11} のBGを 10^{-16} に低減した。LTCの開発成功で本実験計画は格段に進展した。

LTCは全長1mなので分析装置に組み込みやすい。LTC用に、入力1kW以下の小電力で稼動する7MHz、60kVの出力の高周波電源も開発した。パルスビームを用いる極低BG実験一般に有用な装置である。

イオン源バンチャー用の鋸歯状波電源

ビームパルス化効率を95%に上げるために、理想に近い鋸歯状波形をもつ高周波電源 (2-7MHz、 $\pm 250V$) を開発した。コンパクトな装置である。これでイオン源での引き出し電圧を変調させ、イオンビームの前段バンチを行う。今はイオン源が改造中だが、実際に95%の効率でビームがパルス化されて実験に用いられたら、注目されるだろう。

他にも独自開発した、大型タンデム加速器を天体核反応実験用に小型タンデム化する加速減速方式、吹き込み型気体標的の冷却使用など、注目に値する手法や装置がある。本研究の天体核反応実験が成功したときに、広く評価されると期待している。

⑨研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

論文

○ N. Ikeda, K. Sagara, K. Tsuruta, H. Oba, T. Ohta, Y. Noguchi, K. Ichikawa, Y. Miwa and S. Morinobu
 “Facilities for direct measurement of ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$ reaction cross section at KUTL”
 Nuclear Physics A Vol.718 No.2 558c - 560c (2003)

○ H. Oba, K. Sagara, T. Shimizu, M. Oshiro, T. Maeda, and N. Ikeda
 “ A long-time chopper for direct measurement of ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$ reaction cross section”
 Nuclear Physics A 4 pages (2005) in print
 Proceedings of the Eighth International Symposium on Nuclei in the Cosmos(July, 2004)

○ K. Sagara, T. Teranishi, H. Oba, M. Oshiro, M. Kouzuma, K. Nishida, N. Ikeda and S. Tanaka
 “ Direct measurement of ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$ reaction cross section around $E_{\text{cm}} = 2.4$ MeV at KUTL”
 Nuclear Physics A 4 pages (2005) in print
 Proceedings of the Eighth International Symposium on Nuclei in the Cosmos(July, 2004)

K. Sagara, H. Oba and N. Ikeda
 “Strategy for ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$ experiment at KUTL”
 Kyushu University tandem accelerator laboratory report, Vol.9, 49-53 (2004)

K. Sagara, T. Tsuruta, H. Oba, Y. Noguchi, N. Ikeda and K. Ichikawa
 “First measurement of ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$ reaction cross section at $E_{\text{cm}} = 2.4$ MeV”
 Kyushu University tandem accelerator laboratory report, Vol.9, 54-59 (2004)

H. Oba, S. Morinobu, K. Sagara, N. Ikeda and K. Oshiro
 “Renewal of multi-pole magnetic lens system”
 Kyushu University tandem accelerator laboratory report, Vol.9, 89-92 (2004)

K. Sagara, H. Oba, T. Shimizu, K. Oshiro, T. Maeda, and N. Ikeda
 “Development of long-time chopper for reaction recoils”
 Kyushu University tandem accelerator laboratory report, Vol.9, 93-97 (2004)

相良建至、中島孝夫、中村雅子、大庭弘、清水敏郎、大城政邦、西田啓祐、上妻宗弘、池田伸夫
 九大タンデムの簡便な小型化と極微粒子検出
 原子核研究 Vol.49 No.5 39-45 (2005)

国際会議発表

N. Ikeda, K. Sagara, H. Oba, T. Shimizu, M. Oshiro, K. Tsuruta, T. Ohta, Y. Noguchi, K. Ichikawa, T. Izumi, and S. Morinobu

“Development of facilities for direct measurement of the ${}^4\text{He}+{}^{12}\text{C}$ radiative capture reaction of astrophysical interest in Kyushu University”

The Fifth Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, Fukuoka, March 7-10, 2004

H. Oba, K. Sagara, T. Shimizu, M. Oshiro, T. Maeda, and N. Ikeda

“A long-time chopper for direct measurement of ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$ reaction cross section”

Eighth International Symposium on Nuclei in the Cosmos, Vancouver, July 19-23, 2004

K. Sagara, T. Teranishi, H. Oba, M. Oshiro, M. Kouzuma, K. Nishida, N. Ikeda and S. Tanaka

“Direct measurement of ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$ reaction cross section around $E_{\text{cm}} = 2.4$ MeV at KUTL”

Eighth International Symposium on Nuclei in the Cosmos, Vancouver, July 19-23, 2004

国内発表

清水敏郎、大庭弘、市川聖久、大城政邦、泉敏治、田中慎一郎、池田伸夫、相良建至

時間幅を持った反応粒子に対するチョッパーの開発

日本物理学会 2003年秋季大会(宮崎) 2003.9.12.

大庭弘、清水敏郎、大城政邦、相良建至、市川聖久、泉敏治、田中慎一郎、池田伸夫

天体核反応測定のための長時間チョッパーの開発

第109回日本物理学会九州支部例会 (宗像) 2003.11.29.

大庭弘、清水敏郎、市川聖久、大城政邦、泉敏治、田中慎一郎、池田伸夫、相良建至

長時間チョッパーによる天体核反応測定BGの除去

日本物理学会 第59回年次大会(福岡) 2004.3.27.

大城政邦、大庭弘、西田啓祐、上妻宗弘、前田豊和、寺西高、相良建至、田中慎一郎、池田伸夫

長時間チョッパー及び多重極電磁石を用いた ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$ 反応断面積直接測定

日本物理学会 2004年秋季大会(高知) 2004.9.29.

大城政邦、大庭弘、西田啓祐、上妻宗弘、前田豊和、寺西高、相良建至、田中慎一郎、池田伸夫

長時間チョッパーによる極低BG下での ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$ 反応測定

第110回日本物理学会九州支部例会 (戸畑) 2004.12.4.

相良建至

九大タンデムでの ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$ 実験 (シンポジウム講演)

日本物理学会 第60回年次大会(野田) 2005.3.24.

大庭弘、大城政邦、上妻宗弘、西田啓祐、前田豊和、寺西高、相良建至、田中慎一郎、池田伸夫
九大における $E_{\text{cm}} = 2.4 \text{ MeV}$ 近傍での ${}^4\text{He}({}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O})\gamma$ 反応断面積直接測定

日本物理学会 第60回年次大会(野田) 2005.3.27.

相良建至、中島孝夫、中村雅子、大庭弘、清水敏郎、大城政邦、西田啓祐、上妻宗弘、池田伸夫
九大タンデムの簡便な小型化と極微粒子検出

第3回小型加速器研究会「小型加速器の開発と利用の開発」 KEK 2004.12.21.