

## 話題 (小型加速器)

## アルミパイプ 4 本で大型タンデムを小型タンデムに変える

相良 建至\*

## Transform of a Large Tandem Accelerator into a Small One Using Four Aluminum Pipes

Kenshi SAGARA\*

## Abstract

At Kyushu University tandem laboratory, preparation for an experiment of  $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$  reaction at stellar energy has been made since 1994. The experiment is very difficult because the reaction cross section should be measured down to 1 pbarn. Many instruments and methods have been invented and developed. Some of them, accel-decel operation of the tandem accelerator, a windowless gas target, and a long-time chopper, are described.

## 1. はじめに

太陽の 8 倍以上重い星では水素燃焼を終えた後にヘリウム燃焼が始まる。超新星爆発にも関係するこのヘリウム燃焼で重要な働きをする  $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$  反応の速度は、過去約 40 年にわたり世界中で様々な測定が試みられたが、未だに正確な測定値が得られていない。クーロン障壁のために反応数が極めて少ないので、非常に難しい実験である。

我々九大グループは 12 年前からこの測定の準備を進めてきた。ビーム量、標的量、検出効率を限界まで増やし、バックグラウンド (BG) を未踏のレベルまで低減し、そして反応速度絶対値を精度よく評価するための手法を開発してきた。

例えば、ビーム量を増やすためにタンデム加速器の新しい加速減速強集束運転法を考案した。BG を低減するためにビームをパルス化し、かつパルス化効率を高めた。ヘリウムガスを真空中に膜なしで閉じ込める新装置も開発した。反応生成粒子全てを集束して検出する装置、時間幅を持つ生成粒子を通しつつ BG を 3 桁減らすチョッパーも作製した。イオン源～加速器～ビームライン～ターゲット～分析器の全てにわたってこの実験のために新作し改造した、と言える。

やっと今年から本測定が出来る段階になった。今後数年間で測定を終了して、40 年間待たれていたデータを得る計画である。以下では、考案した手法や装置のいくつかを紹介する。

## 2. タンデムからのビーム量を増やす

この天体核反応測定に必要なのは、2.8~10 MeV の  $^{12}\text{C}$  ビームである。エネルギーが低くなるとクーロン障壁のために反応数が急激に減るので、出来るだけ多くのビーム量が必要である。2.8 MeV では 10 particle  $\mu\text{A}$  のビーム量が欲しいが、それでも予想される検出粒子数が 1 日 5 個である。

九大タンデムは 6-10 MV で使用するよう設計されており、5 MV 辺りからビーム通過率が悪くなり、1 MV では 5% 程度に下がる。これでは 10 particle- $\mu\text{A}$  のビームは到底得られない。

## 2.1 小型タンデムは導入できない

どうすれば良いか？ 誰に相談しても「小型タンデムを買えば良い」との答が返ってきた。しかし、小型タンデムを買うには数億円が要る。たとえ買えても、現有タンデムと入れ替えたなら他の実験が出来なくなる。大型と小型のタンデム 2 つを並べるスペースもない。もし可能なら現有タンデムを小型タンデムに変身させるしかない。

## 2.2 部分ショート方式

先ず、以前から知られている、タンデム加速管の一部分をショートして電場を他の部分に集中させ集束力を強める方法 (図 1) を検討した。これなら容易に実現できる。しかし、集束計算してみるとアクセプタンスは 1 割しか増えないと判り、断念した。

\* 九州大学大学院理学研究院 Department of Physics, Kyushu University  
(E-mail: sagara@kutl.kyushu-u.ac.jp)

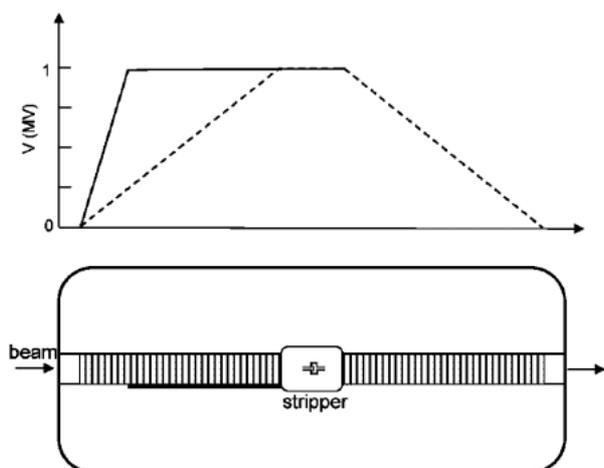


図1 タンデムの通常の加速電圧（破線）と部分ショート時の加速電圧（実線）。

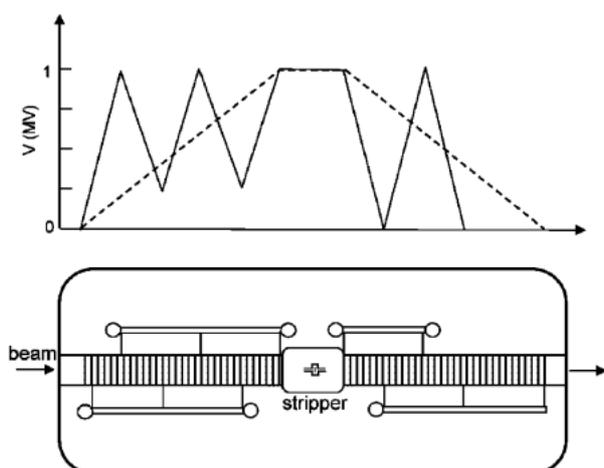


図2 タンデムの通常の加速電圧（破線）と加速減速時の加速電圧（実線）。アルミパイプ4本を装着すれば加速減速運転ができる。

### 2.3 加速減速強集束方式

そこで考案したのが、図2に示す方法である。電圧を上げ下げして加速と減速を繰り返し、集束と発散の繰り返しで集束作用を発生させる（強集束の原理）方法である。アインツェルレンズからの連想であった。我々はこれを加速減速方式と呼んでいる<sup>1)</sup>。計算によると中央部までの低エネルギー側のアクセプタンスは13.5倍増加する。高エネルギー側も加速・減速をさせれば13.5倍を保持できる。

早速この方法を試みた。原理的には4本のリード線があればよい。実際には、図2のように4本のアルミパイプを装着して高電圧部と低電圧部を交互に作った。邪魔な突起物をつけるのでスパーク放電しやすくなるが、アルミパイプの先端に金属球をかぶせて、

中央部電圧が1.5 MVまで無放電にした。

中央部を1 MVにして、通常方式と加速減速方式とで<sup>12</sup>Cビームの加速をしたところ、ビームのタンデム通過率（粒子数比）が4.5%と45%であった。ほぼ計算通りの10倍になった。ビーム強度を10倍に出来ることが判った。

この方式ではさらにビーム強度を増やせる。図2の電圧形を維持するには通常の電圧形（破線）に比べて17.5倍の電力が要る。九大タンデムのチェーンシステムによる電力供給では加速電圧1.5 MVまで実現できる。電力が17.5倍要ることは、同じビーム量なら電圧が通常方式より17.5倍も安定であり、同じ安定性なら入射ビーム量を17.5倍を増やせることを意味する。まだテストをしていないが10倍は確かだろうから、加速減速方式で10倍×10倍=100倍のビーム増が期待される。

アルミパイプ4本で大型タンデムを小型タンデムに変えることが出来た。アルミパイプを外せば通常のタンデムに戻る。つまり、4本のアルミパイプ脱着で念願の大型タンデム⇄小型タンデムの変身が出来る。

アルミパイプ脱着にはタンデムタンク内のSF6ガスを回収してタンク内に入る必要がある。タンク内に入らずに済ませる改造案も原理的にはあるが、天体核実験を急ぐので、これ以上は考えていない。

### 2.4 大口径ガスストリッパー

我々はまた、低エネルギー重イオンビーム加速のために、大口径ガスストリッパーを自作した。口径12 mm、前長600 mmで、炭素フォイルストリッパーと共用できる。ガスだとストリッパーを薄く出来るので、ビームのエネルギー拡がりや角度拡がりが減り、天体核実験に使えるビーム量が5~10倍増えた。これで2.8 MeVの炭素ビーム量を10 particle $\mu$ Aにする目途が立った。

## 3. 吹き込み型膜なし気体標的

標的はヘリウムガスであるが、この量も増やした。低エネルギー<sup>12</sup>Cビームを使うし、生成粒子の<sup>12</sup>Oも低エネルギーなので、標的ガスを閉じ込める薄膜が使えない。膜なしで、真空中にガスを閉じ込める必要がある。

これまでの膜なし気体標的には、差動排気方式とガスジェット方式がある。前者は標的気体の流出コンダクタンスを悪くして閉じ込めるが、流出量が多くて標的を厚く出来ない。後者は標的を厚く出来るが大掛かりな排気システムが要る。

そこで、吹き込み型気体標的を考案した<sup>2)</sup>（図3）。

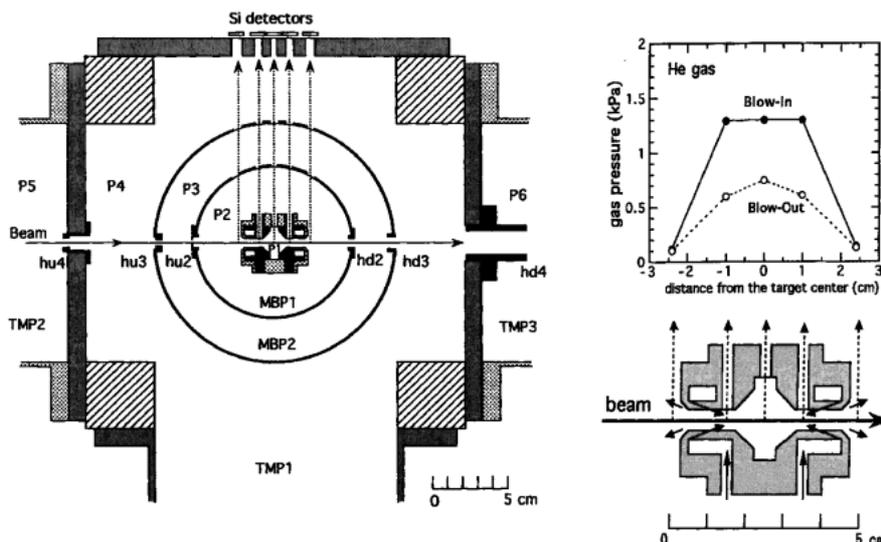


図3 吹き込み型気体標的の側面図(左)と陽子散乱で測定した気圧分布(右)。

流出コンダクタンスを悪くしたトンネルの内壁からガスを標的中央に向かって吹き込むのである。吹き込みギャップ幅と吹き込み角度の最適値を実験で見つけた。ガス圧の分布を陽子ビームの90度散乱を利用して測定したところ、標的中央でガス圧が高く一定(淀み点)であり、吹き込み部で急激に減少する理想的な形であった(図3右)。これまでの差動排気方式では標的中央部にガスを吹き出すので、吹き出し型と呼ぶ。吹き出し型のガス圧分布も図3左に示す。

吹き込み型は窒素ガスやアルゴンガスなどには非常に有効である。理研で2次ビーム生成に炭酸ガスの吹き込み型標的が用いられた。しかしヘリウムガスや水素ガスに対しては閉じ込め効率が落ち、天体核実験には数倍不足である。

吹き込み型ヘリウムガス標的を液体窒素で冷却するテスト実験をしたら、標的厚が数倍増えることが判った。本格的に冷却するには、差動排気のための多殻構造に横穴をあけて液体窒素を注入しかつガス化した窒素を回収する必要がある。非常に複雑な構造になり設計が大変である。

昨年、窒化シリコンの薄膜(50 nm = 12 μg/cm<sup>2</sup>)で膜あり標的を試作した。うまくゆけば冷却膜なし標的が不要になる。窒化シリコン薄膜の耐圧性は良かった。しかし残念ながら、耐ビーム性が不足で断念した。そして複雑な構造の冷却システムを設計し製作した。目下性能テスト中である。

#### 4. バックグラウンド低減

粒子検出数が1日5個と少ないのでバックグラ

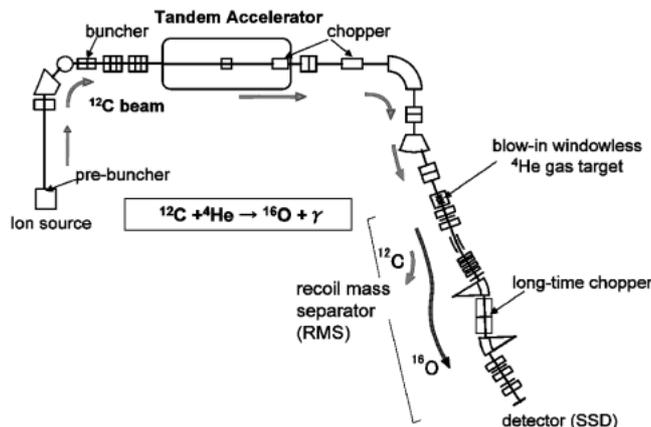


図4  $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$  実験セットアップ全系。

ドを極限まで低減する必要がある。我々の $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$ 実験では、検出 $^{16}\text{O}$ とビーム $^{12}\text{C}$ の個数比が約 $10^{-18}$ になる低エネルギーまで測定するので、BGを $10^{-19}$ 以下にすることが必要である。

#### 4.1 反跳粒子質量分析器

図4に実験セットアップを示す。ヘリウム気体標的で生成される $^{16}\text{O}$ は前方2度以内に放出されるので、これら全てを森信俊平先生の設計された反跳粒子質量分析器(RMS)で集めて検出する。RMSは $^{16}\text{O}$ と $^{12}\text{C}$ ビームを速度分散と質量分散により2重に分離する。RMSでBG( $^{12}\text{C}$ ビーム)を約 $10^{-11.5}$ に出来た。

#### 4.2 ビームパルス化

連続ビームを150 ns間隔で5 ns幅のパルスビームにすると、時間的構造のないバックグラウンド(BG)なら1/30に削減出来る。実際にはBGに時間的構造

があり、我々はそれを利用してBGを約 $10^{-2.5}$ に低減できた。RMSとパルスビームで計 $10^{-14}$ の世界的レベルに達した。しかし、まだ最終目標の $10^{-19}$ には5桁不足である。

連続ビームをタンデム入射前にバンチャーを用いてパルス化し、加速後にパルス化されなかった成分をチョッパーで除去するが、正弦波電圧のバンチャーだけではパルス化効率が低いので、最近イオン源の引出し電圧に鋸歯状波電圧を印加して前段バンチをした。前段バンチに必要な飛行時間（距離4 m）を確保するためにイオン源を移動させた。これでパルス化効率が約60%になったが、今後の改良で80%程度にする。

#### 4.3 長時間チョッパー

さらなるBG低減のために考案したのが長時間チョッパーである。フラットトップ電圧を2~6 MHz、 $\pm 30$  kV電源と5~20 MHz、 $\pm 5$  kV電源でつくり、直流電源でフラットトップ部分を0 Vにする。0 Vの間に時間的拡がりのある反応生成 $^{16}\text{O}$ 粒子全てを通過させ、残りの時間に来るBGは高電圧で偏向して除去する。0 Vの間に $^{16}\text{O}$ 粒子と同時に通過したBGは検出器までの飛行時間差で $^{16}\text{O}$ 粒子と分離する（図4）。

これでBGをさらに3桁低減でき、BGはビームに対して $10^{-17}$ のレベルになった。最終目標には2桁不足であるが、 $^{12}\text{C}$ ビームエネルギーが比較的高い5~

10 MeVでの実験が可能になった。

## 5. おわりに

天体での $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$ 反応速度を測定する準備を始めて12年で、ようやく実験が開始できた。これから約3年間で $^{12}\text{C}$ ビームエネルギーが2.8~10 MeVの領域で反応速度を測定し終え、1.2 MeVでの値を外挿により求め、40年間の世界的競争を終わらせることが目標である。ライバルはドイツ・ルール大学のグループである。

まだ、BGのさらなる2桁低減、大強度ビームの実際の加速、1ヶ月実験に耐える加速器・測定器の安定制御など課題が残っているが、今までの経験から「これくらいは何とかなる」と考えている。

12年間の加速器・測定器開発は九大の研究者、技術職員、多くの大学院生の参画・協力で実現しました。何としても実験を成功させ、皆で祝杯を上げたい、と思っています。

## 参考文献

- 1) K. Sagara et al., Nucl. Instr. & Methods, **A484** (2002) 88
- 2) K. Sagara et al., Nucl. Instr. & Methods, **A378** (1996) 392