

プログラム名：核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化

PM名：藤田 玲子

プロジェクト名：核変換システム評価と要素技術開発

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 28 年度

研究開発課題名：

加速器及び標的の要素技術開発

研究開発機関名：

国立研究開発法人理化学研究所

研究開発責任者

上垣外 修一

# I 当該年度における計画と成果

## 1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

### 大強度重陽子加速器

超伝導線形加速器の開発においては、H27年度に組み立てを終えたバルクニオブ空洞の周波数測定を行う。周波数微調整を行ったあと、ヘリウム温度まで冷却し空洞性能試験を実施することとした。

これと並行して、大電力高周波カプラーの開発を進め、カプラーをテストスタンドに組み込んで大電力の高周波で試験とコンディショニングを行うことを目指した。

さらに、H27年度に引き続き、高効率クライオモジュールの開発を進め、製作・組み立てを行って、冷却試験を実施することとした。

### 大強度ビーム加速の効率化

大強度化のための検討では、大強度重陽子ビームを 40 MeV まで加速する RFQ および線形加速器のビームダイナミクスの検討を開始するとともに、プロジェクト2と連携して、大強度重陽子ビームを蓄積するリング型加速器の検討を開始することを目指した。

### 大強度中性子発生標的および窓なし真空封止技術

大強度中性子発生標的における H28 年度の目標の一つは、液体リチウムの液に沿って磁場を印加することにより、その均一度や表面張力による変形が抑えられることを実証することであった。磁場印加の向きや大きさについては、予め流体シミュレーションにより最適化し、磁場を印加した状態で安定な液体リチウム膜の生成を目指した。

もう一つの開発項目である窓なし真空封止技術については、大口径化したプラズマウィンドウの動作実証を行うことであった。さらに液体金属窓の実証試験も目指した。

これらと並行して、パラジウムイオンインプランテーションのクールドテストを行い、セシウムイオンの生成効率を得ることを目標にした。

## 2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

### 2-1 進捗状況

#### 大強度重陽子加速器

超伝導空洞の開発では、低温部分の溶接及び高周波面の表面処理を実施し、完成した空洞単体をヘリウム温度まで冷却して性能試験を行った。9月に実施した試験では、後述するように、目標性能を超える結果が得られた。

空洞に高周波電力を供給する大電力カプラーは、10 kW の高周波電力による試験を実施した。真空窓を破損させることなく 10kW の通過電力による試験に成功した。

H28 年度後半には、性能試験を終えた空洞とカプラーを組み合わせ、クライオスタットと呼ばれる断熱真空容器に組み込み、予定どおりクライオモジュールを完成させた。

#### 大強度ビーム加速の効率化

大強度重陽子ビームのための初段加速器として、PARMTEQ プログラムなどを駆使して、RFQ のビームシミュレーションを行った。まず IFMIF の RFQ (175 MHz、130 mA) のシミュレーション結果

をほぼ再現した。そのあと、当初の目標である、75.5MHzで動作するRFQを設計し、400 mAの重陽子を2.5 MeVまで加速するシミュレーションを行った。入射ビームのエミッタンスや同期位相を含む多数のパラメータを丹念に調整して計算した結果、低エネルギー領域に置けるビームのバンチ過程がビームロスの主要因の一つであることがわかった。一方、後段のDTLのシミュレーションには着手することができなかった。

#### 大強度中性子発生標のおよび窓なし真空封止技術

平成28年度は、昨年度から開発に着手した、裏板を使わない液体リチウム膜の表面状態を定量的に把握するため、光コム距離計を用いて液面の揺らぎを測定することを試みた。この光コム距離計は、500kHzもの早いサンプリングが可能であるとともに、今回の自由表面のように反射面が傾く場合においても、距離を正確に計測できる(図1)。

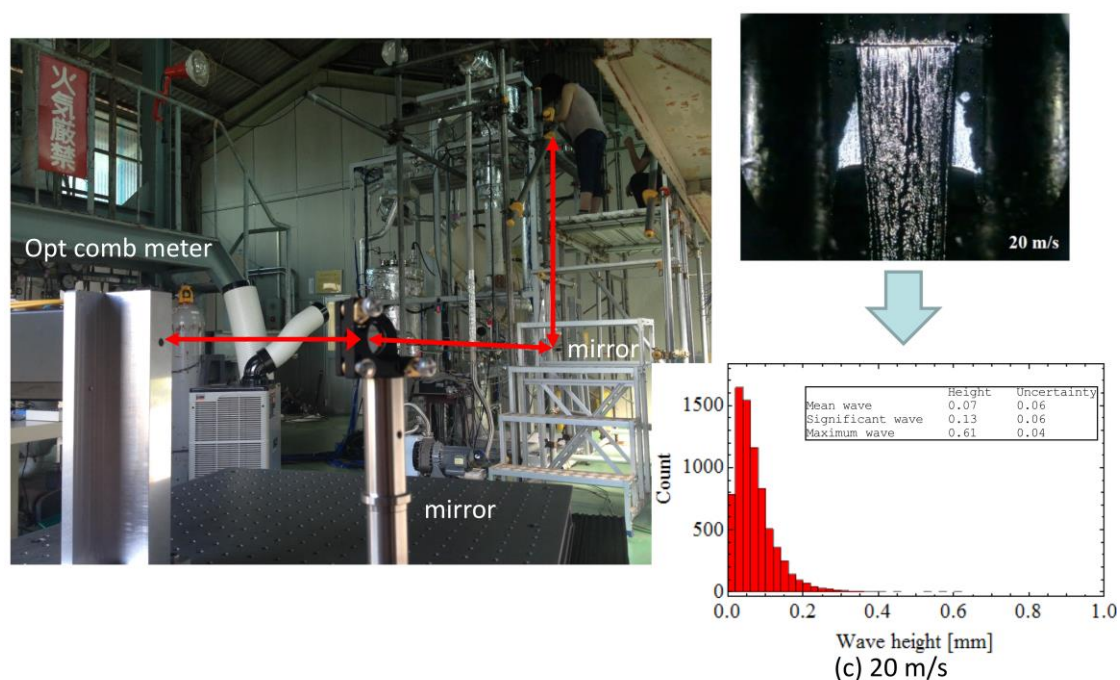


図1：光コム距離計を用いた液体リチウム自由表面流の表面状態の測定

窓なし真空封止技術については、平成27年度に行った、プラズマウィンドウの長さが圧力差に及ぼす影響に関する試験結果をもとに、アパーチャー径を最大20mmまで変化させることができる大口径プラズマウィンドウを設計し、試験を開始した。使用した試験設備では、ソレノイド磁石を用いてプラズマウィンドウの軸方向に磁場を印加した。またプラズマウィンドウ内に生じるアークプラズマの特性を正しく把握するため、詳細なプラズマ分光を行った。そして実際に10mmと20mmの直径での点火に成功した。なお、液体金属窓については、着手することができなかった。

#### パラジウムイオンインプランテーション装置の開発及びセシウム生成効率

パラジウムイオンインプランテーション装置にはイオンを生成させるイオン源が必要であるが、今年度は主にパラジウムの負イオンを生成させるためのイオン源の開発を行った。この開発はプロジェクト2及び3における核変換実証試験に引き継がれる。セシウムの生成効率の検討については着手するには至らなかった。

## 2-2 成果

### 大強度重陽子加速器

上述したように、9月に行った空洞の性能試験において、空洞の損失の割合を示す  $Q$  値が  $8.5 \times 10^9$ 、を得た。この時発生した加速電圧はギャップあたり 1.6 MV であった。これらは目標性能を上回るものである (図 2)。

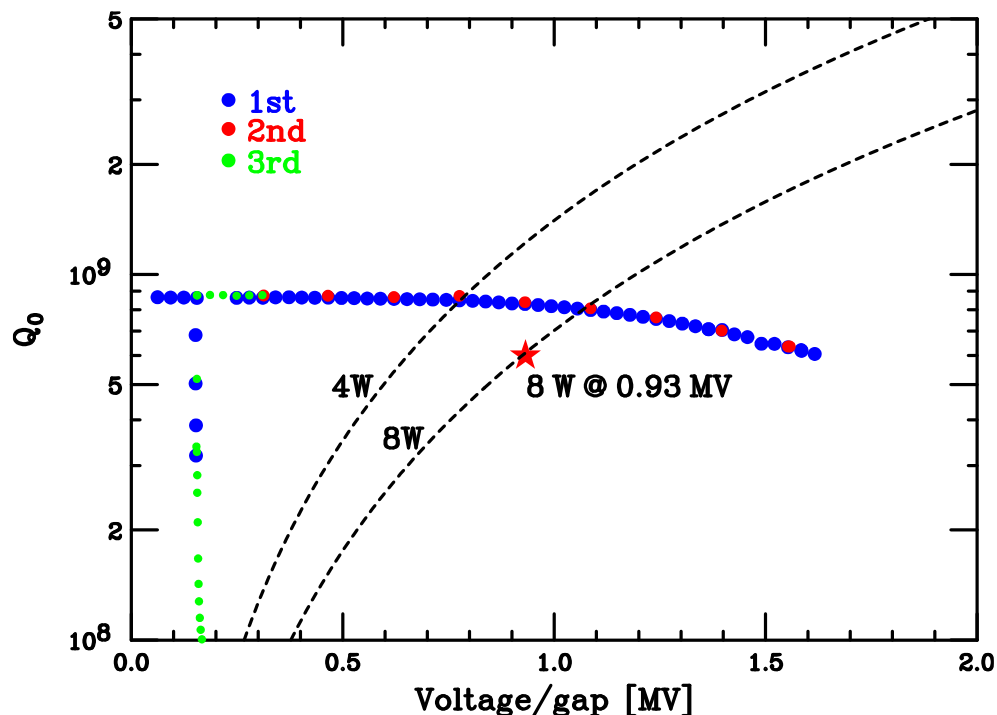


図 2 : 9月に行った超伝導空洞の試験結果。横軸はギャップあたりの発生電圧、縦軸は  $Q$  値。

引き続き、超伝導加速器の重要な構成要素である電力カップラーの開発を行なった。平成 27 年度に開発したカップラー試験用空洞に接続し、セラミック製の真空窓に損傷を与えることなく 10 kW の電力試験に成功した。

その後、空洞とカップラーを断熱真空容器に組み込みクライオモジュールを完成させた。3月には、冷却試験を実施し 10 K まで問題なく冷却できることを確認した。

### 大強度ビーム加速の効率化

400 mA の大強度重陽子ビームを、2.5 MeV まで、92.0-93.3 % の効率で加速する RFQ のビーム設計に成功した。より低い電流では加速効率がさらに向上することも判明し、200 mA では 99 % 以上になることを確かめた。平成 29 年の国際会議で発表する予定である。

### 大強度中性子発生標のおよび窓なし真空封止技術

今回の光コム距離計を用いた測定から、波高分布は流速によらず概ね 0.1mm 程度であるが、波の数は流速が増えるとともに増加することがわかった。さらに、計画したように、永久磁石を用いて液体リチウムの流れる方向に磁場を印加する装置を設計製作し、磁場印加試験を行って、自由表面が変化するかどうかを確認した。しかしながら、目立った抑制効果は見られなかった。原因は、液体リチウ

ムを流し始める時や流れを止める時に、永久磁石（ネオジウム）に高音の液体リチウムがかかり、磁場が低下したためであると思われる。

窓無し真空封止技術については、上述したように口径 20 mm のプラズマウィンドウの点火試験に成功した。得られたデータは現在解析中であるが、プラズマウィンドウとしての機能を表す圧力差は、20 mm においては、わずかなものであることがわかった。

## 2-3 新たな課題など

### 大強度重陽子加速器

加速空洞の内筒の機械的振動が、共振電磁場に及ぼす影響を評価することの重要性が明らかになった。次年度に制御装置を開発して試験を行う予定である。

### 大強度ビーム加速の効率化

加速効率をさらに上げるための手段として、加速ビームの熱力学的な特性を制御する方法（equipartitioning 法）が有効であるという示唆を受けたため、次年度から検討を会する予定である。

### 大強度中性子発生標的および窓なし真空封止技術

上述した高温の液体リチウムによる減磁を防ぐため、350 °C程度まで磁化が保たれるサマリウムコバルトを用いるとともに、磁石の構造を単純化して、自由表面状態の波の磁場による抑制効果の検証を行う予定である。

プラズマウィンドウの開発では、プラズマ分光によって電子の温度・密度等の解析を行っており、より良い条件があるかどうか検討する。

## 3. アウトリーチ活動報告

### 大強度重陽子加速器

2-2 成果. に記載した大強度重陽子加速器の試験結果に関して、10 月に仙台で行われた国際会議 Asia Nuclear Prospects 2016 にて速報するとともに、プレスリリースを行った。