

統合計画用 ACS 加速管の製作

林崎規託^{A)}, 青 寛幸^{B)}, 山崎良成^{B)}, 池上雅紀^{C)}

^{A)}東京工業大学 原子炉工学研究所

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

^{B)}日本原子力研究所東海研究所 大強度陽子加速器施設開発センター

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

^{C)}高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

統合計画用大強度陽子加速器における高エネルギー線形加速器として、環結合構造 (Annular Coupled Structure: ACS) 型加速管の製作が進められている。そのシステム概要と、開発および製作状況について報告する。

1. はじめに

日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構は、共同で大強度陽子加速器の建設を推進している^[1]。その第 1 期計画における線形加速器部分は、出射エネルギーが 3 MeV の RFQ, 50 MeV の DTL, 190 MeV の SDTL, 400 MeV の ACS より構成される。また, SDTL から ACS の間に位置する MEBT2, ACS から 3 GeV リングまでを接続する L3BT と呼ばれるビーム輸送系には、ビーム整合用空洞として ACS と同じ構造をもつバンチャー空洞とディバンチャー空洞が各々配置される。線形加速器システムの運転周波数は、RFQ から SDTL までが 324 MHz であり、ACS 型各空洞は加速勾配の向上のために 972 MHz となっている。

統合計画における ACS 加速管の開発研究は 1999 年より始められ、これまでにビーム力学設計、電磁気特性の最適化と各種モデルによる高周波試験、機械的特性や加工方法の検証試験などをおこなってきた^[2-3]。そして現在、初号機としてバンチャー空洞を製作している。本論文では、ACS 加速管のシステム概要、開発および製作状況について述べる。

2. ACS 型加速管

2.1 基本構造

ACS 加速管は、1972 年に旧ソ連の V. G. Andreev により基本構造の提案がなされた、 $\pi/2$ モードで運転される結合空洞型加速管の 1 種である^[4]。その特徴は、空洞内部の隣り合った加速セルを電磁氣的に接続するための結合セルがリング状になっており、

ビーム軸を中心にして加速セルを取り囲むように配置され、結合スロットと呼ばれる開孔部を通じて加速セルと繋がっている点である。

ACS 加速管の最も総合的な特性研究は、1990 年代前半の高エネルギー加速器研究所の JHP 加速器研究においておこなわれている^[5-9]。JHP モデルについては、1296 MHz の運転周波数において、結合スロット数やその形状、効果的な冷却方法、橋絡空洞の導入などが、電磁場解析コードやコールドモデル、大電力試験を通じて検証評価され、基本デザインが確立されるとともに、空洞設計や製作に対する各種の知見が得られている。

ACS 加速管の実用化は、今回の統合計画が世界初となるため、過去の開発研究で培われた技術成果をもとに、安定性と量産性を重視した設計を目指した。とくに JHP モデルとの大きな変更点は、運転周波数が 3/4 倍の 972 MHz となったことと、最終的な運転デューティとして 15% 対応を考慮したことである。そして、JHP モデルを周波数でスケールリングしたものを参考に、空洞の小型化や冷却性能の確保などの点について留意しながら再設計をおこなった。

2.2 システム構成

ACS 加速管は図 1 に示すように、加速空洞 2 台、橋絡空洞 1 台および設置用架台から構成され、これを基本モジュールとして 191 ~ 400 MeV までの間に 23 モジュールが配置される予定である。隣接するモジュール間およびモジュール内の加速空洞間には $4.5\beta\lambda$ の間隔があり、ビーム収束用のダブレット型四重極電磁石が設置される。加速空洞は 15 の加速セルと 14 の結合セルから構成され、それぞれを半セルずつ反対面に形成した無酸素銅円板を基本セグメントとして (図 2)、積層後に口付することで製作する。また、橋絡空洞はディスクロード形状をしており、励振セルが 5 セルと結合セルが 4 セルをもつ。その他に、加速空洞と橋絡空洞の接続部に中間結合セルが 1 セル、加速空洞の端部セルを介した対称位置に半結合セルが 1 セル配置される。真空排気は、加速空洞末端の真空マニホールドにイオンポンプと

¹ E-mail: nhayashi@nr.titech.ac.jp

粗引きポンプを接続しておこなわれる。高周波大電力は、橋絡空洞の中央励振セルに接続された導波管（WR975）より供給され、各励振セルに装着されたプランジャ式チューナーによって周波数調整がなされる。また、レーザーアライメント用の半導体ターゲット箱が支持用の腕木を介して加速空洞のビーム軸から水平方向 700 mm の位置に取り付けられる。統合計画用 ACS 加速管の主要パラメータについては、参考文献[2]の一覧表を参照されたい。

なお、MEBT2 のバンチャー空洞についてはビームエネルギーが 190.8 MeV であり、加速空洞の加速セルは 5 セルで結合セルが 4 セル、橋絡空洞の励振セルは 3 セルで結合セルが 2 セルと各々減少する。また、加速空洞の間隔は $2.5\beta\lambda$ で、四重極電磁石は配置されないものとなっている。

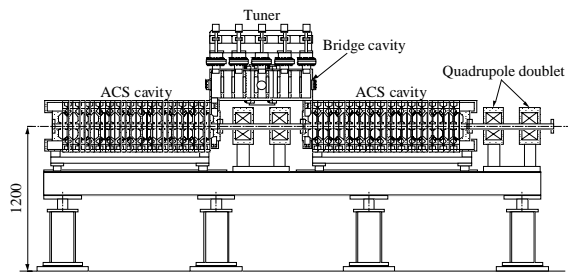


図 1：ACS モジュール構成図

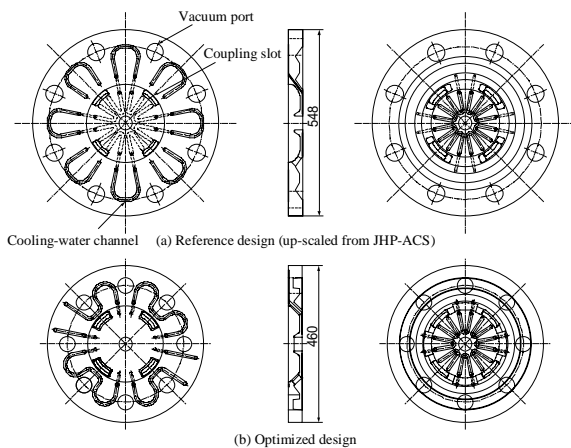


図 2：ACS 加速空洞の基本セグメント

2.3 電磁気的設計

統合計画用 ACS 加速管の電磁気的設計は、JHP モデルの基本形状をもとにして、MAFIA 等を用いた高周波解析により最適化をおこなった^[10]。そして現在、等寸および 1/2 縮尺のコールドモデルによる比較検証を進めている^[3]。

加速セルについては、運転周波数の変更にもなう形状調整とあわせて最大表面電場を $0.85E_{kilpatrick}$ まで向上させ、実効シャントインピーダンス計算値としては最大 $45 \text{ M}\Omega/\text{m}$ が得られている。

結合セルについては、運転周波数変更にもなう空洞外径の増加を抑えるために、真空ポート位置を中心側に移動するなど、全体的に形状見直しをおこなった。その結果、空洞外径は図 2 に示したように JHP モデルを周波数でスケールしたのものよりも約 90 mm ほど小さい $\phi 460 \text{ mm}$ が達成され、また真空ポート等による結合度変化も許容範囲内であった。

結合スロットに関しては、JHP モデルと同じく 90 度おきに 4 ヶ所配置するが、加速セル中央面に対する位置関係は変更し、電場測定時の境界条件等を考慮して鏡面对称とした。なお、結合度はビームエネルギーによって異なるが 5.5~6% である。

高周波発熱による空洞温度上昇と周波数変化は ANSYS により評価をおこない、運転デューティ 3% において最大 4 の温度上昇と、加速セルで -42 kHz、結合セルで 9 kHz の周波数変化が予想されている。ただし、これらの周波数の変化はチューナーによる調整範囲内である。

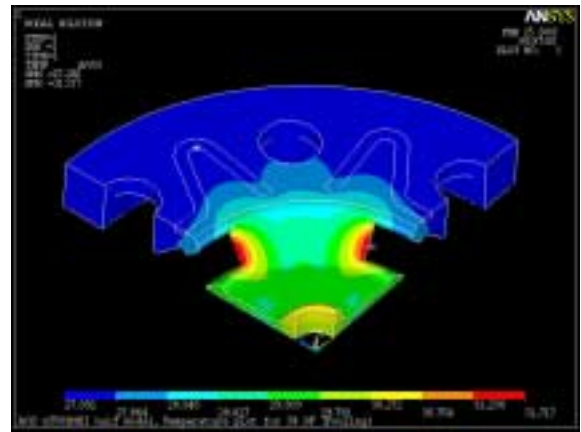


図 3：ANSYS による空洞発熱解析結果

3. 製作方法

ACS 加速管の加速空洞および橋絡空洞の材料には、十分に鍛造処理をおこなった無酸素銅（Class 1）を使用し、各部は形状加工後にロウ付によって組み立てられる。切削加工の工程は粗加工と仕上げ加工に大別され、後者の開始前に加工応力を除去するための焼鈍処理をおこなう。ただし、最終仕上げ加工は超精密旋盤によりおこなうため、結合スロットや真空ポートなど開孔作業を必要とする部分は、粗加工時において仕上げまで完了しておく。ロウ付には真空炉を使用し、各部分の構成と製作手順にしたがって、BAu-11V および BAu-12V を用いた金ロウ付と BAg-8 を用いた銀ロウ付をおこなう。

焼鈍処理の必要性は、等寸大モデルによる加熱試験を通じて検証した。その試験においては、JHP モデルについて周波数スケールをした、最も空洞サイズ条件が厳しいと考えられる形状モデルについて、応力除去焼鈍の有無によるロウ付前後の変形量の比較をおこなった。その結果、焼鈍無しの場合にノーズコーン付近のロウ付面において、最大 $40 \mu\text{m}$

の変形による隙間が生じたのに対し、焼鈍有りの場合は問題が生じないことが確認された。

無酸素銅から製作された中間セグメントは1枚あたり40～50 kgの重量があり、加速タンク全体では最大約1600 kgとなる。ロウ付は中間セグメントを縦方向に積層した状態でおこなうため、位置によって荷重条件が異なる。そこで、最も厳しい荷重条件が与えられる中間セグメントの変形量を評価するために、荷重負荷ロウ付試験をおこなった。これは1700 kgの荷重を加えた状態で中間セグメント2枚を銀ロウ付し(図4)、ロウ付の健全性やロウ付前後の変形量を確認するものである。この試験の結果、荷重負荷の有無によって大きな変形等は生じないことが分かった。

加速空洞と橋絡空洞の接続部は複雑な構造をもっており、複数回のロウ付工程を必要とする。したがって、確実なロウ付手法を確立することが必要である。等寸大の接続部モデルを用いたロウ付試験をおこなった結果、金ロウ付の不良による真空リークが発生したため、現在はロウ付面形状の改良がおこなわれている。

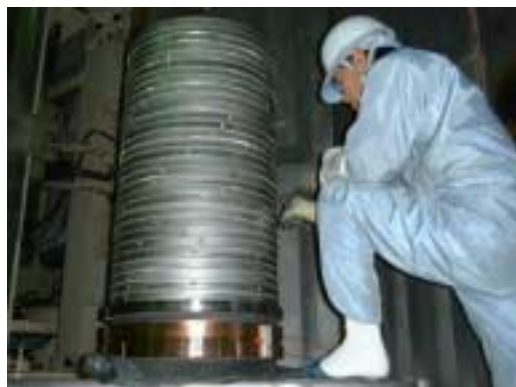


図4：荷重負荷ロウ付試験セットアップ

4. バンチャー空洞の製作

ACS 加速管の初号機としてバンチャー空洞の製作が、今年末の完成を目指して本年4月より着手されている。統合計画用のACS空洞としては、これが初めての大電力実証機となり、完成後は日本原子力研究所東海研究所において各種試験がおこなわれる予定である。

統合計画用 ACS 加速管の機械加工に関する各種試験は過去におこなわれてきているが、最終設計形状の適用は今回が初めてである。したがって、その作業は慎重に進められており、現在は等寸モデルを用いた試切削を通じて加工手順や変形量の最終確認が進められている。現在は、アルミニウムモデルによる試切削が完了し、次段階として無酸素銅による試切削作業を開始したところである(図5)。

また、バンチャー空洞本体のほかに、972 MHz 用高周波窓や WR975 矩形導波管用の真空対応角フランジの製作も並行して進められている。

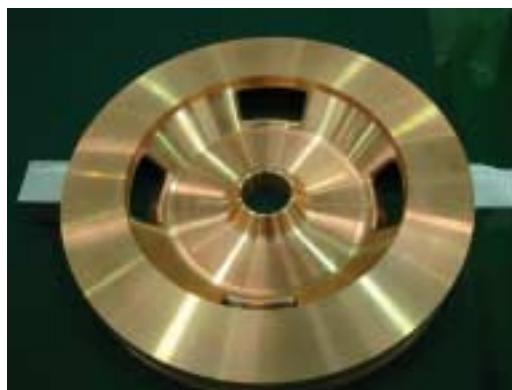


図5：無酸素銅による試切削モデル

5. まとめ

統合計画用大強度陽子加速器の ACS 加速管について開発設計と各種試験をおこない、その初号機としてバンチャー空洞の製作を進めている。とくに ACS 加速管の実用化は今回が世界初となるため、各部の設計は量産性と安定性が考慮されている。なかでも空洞形状については、過去の JHP モデルを参考にして最適化をおこない、周波数の変更による空洞径の増加を抑えることに成功した。今後は、実機製作における高周波試験方法などを検討しながら、バンチャー空洞の大電力試験において総合性能の評価をおこなう予定である。

謝辞

ACS 型バンチャー空洞の製作および各種実機モデル試験に関しては、三菱重工業(株)菅野様ならびに三原菱重エンジニアリング(株)高橋様、岡田様ほか、多くの関係者の皆様にご協力をいただいております。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 伊藤崇 他, in these proceedings.
- [2] 池上雅紀 他, in these proceedings.
- [3] 青寛幸 他, in these proceedings.
- [4] V. G. Andreev et al., Proc. of 1972 Proton Linac Conference, (1972) 114.
- [5] Report of the Design Study on the Proton Linac of the JHP [II], KEK Internal 90-16 (1990).
- [6] K. Yamasu et al., Proc. of the 1990 Linac Conference, (1990) 126.
- [7] T. Kageyama et al., Proc. of the 1990 International Linac Conference, (1990) 150.
- [8] Y. Morozumi et al., Proc. of the 1990 International Linac Conference, (1990) 153.
- [9] T. Kageyama et al., Proc. of the 1994 International Linac Conference, (1994) 248.
- [10] V. V. Paramonov, The Annular Coupled Structure optimisation for JAERY/KEK Joint Project for High Intensity Proton Accelerators, KEK Report 2001-14 (2001).