

# J-PARC用ACS加速管の開発

林崎規託<sup>1A)</sup>, 青 寛幸<sup>B)</sup>, 秋川藤志<sup>B)</sup>, 長谷川和男<sup>B)</sup>, 山崎良成<sup>B)</sup>, 池上雅紀<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup>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

<sup>B)</sup>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

<sup>C)</sup>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

J-PARC大強度陽子加速器の高エネルギーリニアックとして、環状結合構造 (Annular Coupled Structure: ACS) 型加速管の開発が進められている。その概要およびACS型バンチャー空洞の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、中性子科学、原子核・素粒子物理学、核変換技術などの先端研究を目的に、共同で大強度陽子加速器 (J-PARC) の建設を進めている<sup>[1-2]</sup>。この加速器施設は日本原子力研究所東海研究所内に設置され、50GeVシンクロトロン完成後の2007年度より施設供与が開始される予定である。

J-PARCのリニアック部分は、負水素イオン源を起点として、出射エネルギーが3 MeVのRFQ, 50 MeVのDTL, 191 MeVのSDTL, 400 MeVのACS, さらに第一期設備として核変換実験施設に向けた600MeVのSCLより構成される。また、MEBT2(SDTL~ACS間), L3BT(ACS~3GeVシンクロトロン間)と称するビーム輸送系には、ビーム整合用空洞としてACS型のバンチャー空洞とディバンチャー空洞が各2台ずつ配置される。運転周波数は、RFQからSDTLまでが324MHzであり、ACSおよびSCLは加速勾配の向上を期して972MHzとなっている。

J-PARCにおけるACS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、電磁場解析や高周波試験、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<sup>[3-6]</sup>。そして現在、量産機の検討を進めるとともに、大電力初号機としてACS型バンチャー空洞を製作している。また、ACSの周辺機器としては、ビーム収束用四重極電磁石や真空システムなどがあり、これらの設計や製作もあわせて進められている。

## 2. ACS加速管

### 2.1 基本構造

ACSは1972年に旧ソ連において構造提案がなされた、 $TE_{010}$  ( $\pi/2$ モード) で運転される結合空洞型加速管の1種である<sup>[7]</sup>。構造的な特徴は図1に示すように、空洞内部の隣接し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、これが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。

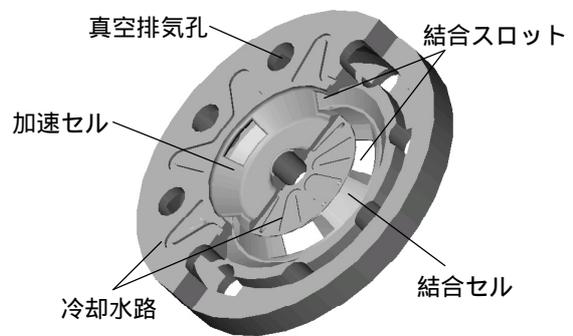


図1: ACS加速空洞の基本セグメント

ACSの最も総合的な特性研究は、高エネ研における過去のJHP加速器研究のなかで、1296MHzの運転周波数に対しておこなわれている<sup>[8-12]</sup>。このときにACSの基本的な構成は確立したといえるが、今回のJ-PARC用ACSを開発するにあたっては、  
運転周波数変更による大型化 極力回避  
デューティ増加による発熱 冷却性能の向上  
量産化対応 精度と信頼性の再確認  
の点に留意しながら、あらためて設計を開始した。そしてこれまでに と は概ね達成し、 については現在進行中である。

<sup>1</sup> E-mail: nhayashi@nr.titech.ac.jp

## 2.2 システム構成

ACSは図2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191～400MeVまでの間に21モジュールが配置される。加速空洞は17の加速セルと16の結合セルから構成され、各々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(図1)として、積層後に口ウ付することで製作する。なお、モジュール数とセル数は最近見直しをおこない、表1に示すようにクライストロン数を削減した。なお、このことによりACSセクションの全長は約1m短くなった。

橋絡空洞はモード混合を回避するために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セルから構成される。また、中央の励振セルは高周波カプラーとして、電力供給用の方形開口部が設けられ、セラミック高周波窓を介して、矩形導波管(WR975)が接続される。周波数の調整は、各励振セルに装着された50mmのプランジャ式可動チューナーによって自動的になされる。このとき駆動系は1台のため、各チューナーの動作量は同じになる。また、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。

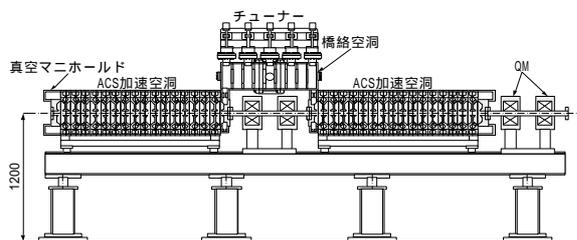


図2：ACSモジュール構成図

表1：ACSの主パラメータ

	当初案	現状
入射エネルギー	190.8 MeV	
出射エネルギー	400 MeV	
運転周波数	972 MHz	
加速粒子	負水素イオン	
ピーク電流	50 mA	
パルス幅	0.5 ms	
繰り返し	50 Hz	
クライストロン数	23	21
モジュール数	23	21
加速セル数/空洞	15	17
結合セル数/空洞	14	16
ポア半径	20 mm	
ピーク高周波電力/モジュール	< 2.0 MW	< 2.1 MW
全長	108.3 m	107.2 m

各セルは構造的に、可動チューナーが取り付けられる橋絡空洞の励振セルと、固定チューナーが取り付けられる中間結合セルを除いては、口ウ付組み立て後の追加工や調整が困難である。したがって、口ウ付前のセル形状加工の段階で精度よく周波数を合わせ込んでおく必要があり、このために加速セルと結合セルには切削調整用の突起部を設けてある。

ACSは空洞内部にビーム収束要素を持たないので、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 $4.5\beta\lambda$ の空間を配し、ダブレット型四重極電磁石を計41台設置する。ダブレット内の四重極電磁石は加速エネルギーに応じて3種類(120, 135, 150mm)の磁極長をもち、すでに製作が開始されている。また、各種ビームモニター(電流モニター、位置モニター、位相モニターなど)が、四重極磁石の内部もしくは加速空洞との間に設置される。

真空排気は、結合セルの外周部に設けられた8個の円形排気孔によりおこなわれる。このため加速セルは結合スロットを通じた排気となる。また、各排気孔は加速空洞末端の真空マニホールドにおいて取りまとめられ、イオンポンプを用いて $10^{-6}$ Pa以下を保つように排気される。また、モジュール間の真空区分のために、前述のダブレット中央にビームライン用ゲートバルブが取り付けられる。

ACSの搬入にあたっては加速器トンネル内の8.5tonクレーンを使用することから、各部重量の概算をおこない、可能な部分は軽量化を図っている。また整列方法には、半導体センサーを用いたJ-PARCリニアック独自のレーザーアライメント法<sup>[13]</sup>と、市販のレーザーセオドライトを用いた三角測量法によるものの2種類が考えられているため、ACSモジュールは両者に対応可能なように準備をしている。

## 2.3 製作方法

ACS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(JIS規格C1020相当品)を使用し、各部は形状加工後に口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、最終仕上げ前までに切削を完了しておく。口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を用いた金口ウ付とBAg-8を用いた銀口ウ付をおこなう。

## 4. ACS型バンチャー空洞

ACSの大電力初号機として、MEBT2用ACS型バンチャー空洞の製作をおこなっている。この空洞はSDTL～ACS間において縦方向のビーム整合をおこなうものである。ACSと比較してバンチャー空洞では加速空洞の加速セルが5セル、結合セルが4セル、

橋絡空洞の励振セルが3セル，結合セルが2セルと各々減少する。また，モジュール内の加速空洞間隔は $2.5\beta\lambda$ で，四重極電磁石は配置されない。その製作は三菱重工業(株)において2002年から開始され，今年度内に完了する予定である。その後は日本原子力研究所東海研究所において，大電力試験をはじめ各種試験をおこなう。

その機械加工に関しては，加速空洞中間セルの切削加工段階にある。なかでも，結合スロットの結合セル側にあるテーパ部加工が複雑で難しく，本加工前に試切削と検証を繰り返す必要があった。現在は，超精密仕上げ加工をおこなっている(図3)。

電磁気設計は，ACS量産機とともに進められている。加速空洞と橋絡空洞の基本形状については，2次元電磁場解析コードのSUPERFISHと，同じく3次元コードのMAFIAを用いて設計をおこない，1/2縮尺アルミニウムモデルによるコールド測定で，各セルおよび空洞全体に対して特性評価をしている<sup>[14]</sup>。また，カプラー部については3次元電磁場解析コードHFSSと，1/2縮尺アルミニウムモデルによる測定から，方形開口部の形状最適化などを進めている<sup>[15]</sup>。



図3：超精密仕上げ後のバンチャー空洞中間セル

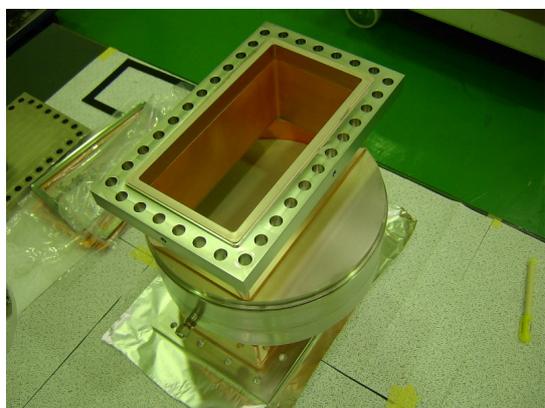


図4：バンチャー用高周波窓（真空フランジ側）

周辺機器としては，ピルボックス型の高周波窓を製作した(図4)。アルミナセラミックスとしては日本特殊陶業(株)HA-95 ( $t=10\text{mm}$ )を使用している。なお，空洞接続側のフランジは真空シールの必要があるのに対し，WR975における設計例がなかったため，今回新しく銅ガスケットシール式フランジの開発と実用化をおこなった。現状としては口付組み立てが完了したので，高周波特性試験の準備をしている。

## 5. まとめ

J-PARC用ACS加速管について設計検討および大電力初号機としてバンチャー空洞の製作をおこなっている。これまでの検討を通じて全体的な設計は固まりつつあるが，検討途中の内容も残り，バンチャー製作と同時進行している部分もある。今後は，バンチャー製作の経験も反映させながら，量産機製作に向けて詳細設計を進めていくつもりである。

## 謝辞

ACS型バンチャー空洞の製作，各種検討・試験に関しては，三菱重工業(株)菅野様および三原菱重エンジニアリング(株)岡田様，高橋様など多くの皆様にご協力をいただいております。また，1/2縮尺アルミニウムモデルの製作および高周波試験に関しては，石川島播磨重工業(株)栄様，山本様，青木様など多くの皆様にご協力をいただいております。この場をお借りしてお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] K. Hasegawa, in these proceedings.
- [2] Accelerator Technical Design Report for High- Intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC, KEK Report 2002-13 (2002).
- [3] M. Ikegami et al., Proceedings of the 27th Linac Meeting in Japan, (2002) 198.
- [4] H. Ao et al., Proceedings of the 27th Linac Meeting in Japan, (2002) 195.
- [5] N. Hayashizaki et al., Proceedings of the 27th Linac Meeting in Japan, (2002) 204.
- [6] V. V. Paramonov, The Annular Coupled Structure optimisation for JAERY/KEK Joint Project for High Intensity Proton Accelerators, KEK Report 2001-14 (2001).
- [7] V. G. Andreev et al., Proc. of 1972 Proton Linac Conference, (1972) 114.
- [8] Report of the Design Study on the Proton Linac of the JHP [II], KEK Internal 90-16 (1990).
- [9] K. Yamasu et al., Proc. of the 1990 Linac Conference, (1990) 126.
- [10] T. Kageyama et al., Proc. of the 1990 International Linac Conference, (1990) 150.
- [11] Y. Morozumi et al., Proc. of the 1990 International Linac Conference, (1990) 153.
- [12] T. Kageyama et al., Proc. of the 1994 International Linac Conference, (1994) 248.
- [13] M. Ikegami, in these proceedings.
- [14] H. Akikawa, in these proceedings.
- [15] H. Ao, in these proceedings.