

## J-PARC 用 ACS 空洞の開発

### DEVELOPMENT OF THE ANNULAR-RING COUPLED STRUCTURE FOR J-PARC

青 寛幸<sup>#, A)</sup>, 菅野東明<sup>B)</sup>

Hiroyuki Ao <sup>#, A)</sup>, Tomei Sugano<sup>B)</sup>

A) Japan Atomic Energy Agency

B) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

#### Abstract

The annular-ring coupled structure for the J-PARC linac has been developed since 1999. A buncher cavity and an accelerating cavity were fabricated by 2007 as prototypes of the J-PARC ACS. After that the mass-production of 21 ACS cavities was commenced from 2009 and successfully completed by March 2013. This accomplishment is due to the fabrication technology and the knowledge of the cell tuning accumulated in the previous R&D period and to the good management of this project including manufacturers and laboratories. All the ACS cavities were installed from the summer of 2013. After the one-month cavity conditioning and beam commissioning, 400-MeV acceleration was achieved in January 2014.

#### 1 はじめに

J-PARC 用 Annular-ring coupled structure (ACS) 空洞の開発は 1999 年の設計に始まり、2014 年のビーム加速に至るまで 15 年の歳月を要した。この期間を大きく分けると、基礎技術の開発、空洞の量産に向けた改良、そして量産と分けられる。本報告では、これまでの経緯を、開発と製造の両面から解説する。

#### 2 J-PARC 以前および初期の開発

Annular-ring coupled structure (ACS) は 1972 年ロシアの Andreev によって提案された加速構造である<sup>[1]</sup>。ACS は従来の Side coupled structure (SCS)<sup>[2]</sup>と同様の  $\pi/2$  モードで運転される結合空洞型リニアックの一種であり、SCS に比べてビーム軸周りの軸対称性に優れる点が ACS の最大の特徴である (Fig. 1 参照)。

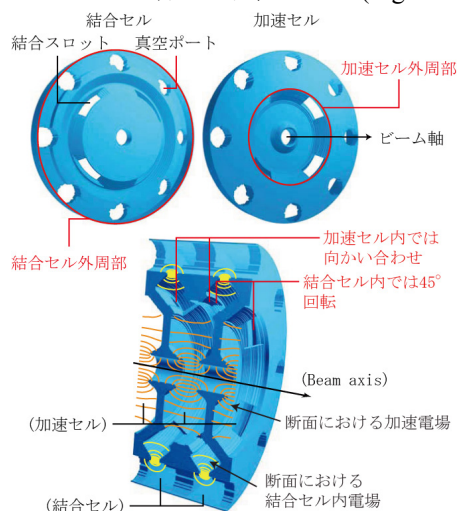


Figure 1: Annular-ring coupled structure for J-PARC (based on [3]).

<sup>#</sup>hiroyuki.ao@j-parc.jp

その軸対称性がもたらす利点としては、

- 加速電場のうちビーム軸に垂直な成分が、無視できるほど小さい (SCS では約 1%)。
- ダイヤモンドバイトを用いた超精密旋盤加工が可能。これによる加工精度と耐放電性の向上。
- SCS の結合セルのように突出部が無く、ロウ付けの高温時にも機械的に安定。

などが挙げられる (欠点については開発課題と合わせて後述する)。

しかしながら、ACS はリング状の結合セル内に発生する多数の固有モードからモード混合の問題が解決できず、長く実用化されなかった。しかし 1989 年から 1990 年にかけて、KEK の大型ハドロン計画 (JHP) の開発の中でこの問題が解決され、世界に先駆けて ACS の実用化に成功した<sup>[4, 5]</sup>。この KEK での開発成果が、J-PARC 用 ACS の基礎となっている。

1999 年からは 190.8 MeV から 400 MeV までの加速空洞用として、新たに J-PARC 用 ACS の開発が始まった。開発面での JHP との大きな違いは、周波数が 1296 MHz から 972 MHz に変更になったことである。単純に外形  $\phi 411$  mm の JHP ACS をそのまま 972 MHz にスケールリングすると外径  $\phi 550$  mm と大きくなり、加工性 (旋盤加工)、組立性が格段に難しくなってしまう。そこでロシアの核研究所 (Institute for Nuclear Research, INR) との共同研究で、性能を保ちながら外径を 1296 MHz の ACS と同程度の  $\phi 430$  mm まで縮小した新たな形状に改良した<sup>[6]</sup>。

これらの設計と並行して熱解析<sup>[7]</sup>を行い、将来的に 15% デューティ (J-PARC では 3%) でも熱応力的に問題ない冷却構造を確保した。これにより、高デューティ化の際には空洞外部の冷却水配管 (銅配管) の変更し流量増に対応する必要があるが、空洞本体はそのまま利用できる構造となっている。

一方、製造面で初期の技術的課題の検証としては、2000 年に JHP ACS を 972 MHz へスケールリングしたモデルでのロウ付け試験<sup>[8]</sup>、3 セル空洞の試作など

が行われた<sup>1</sup>。

### 3 バンチャーモジュールの開発

J-PARC 用 ACS の試作を兼ねた、バンチャーモジュール 1 号機の製作は 2002 年から始まった。本モジュールの断面図を Fig. 2 に示す。この図に示すように 1 台の ACS 空洞は、加速空洞 2 台と橋絡空洞 1 台から構成され、これを我々は ACS“モジュール”と呼んでいる。このモジュール全体が複数の加速セルと結合セルから成る一つの多連空洞で(セル構造は Fig. 1 参照)、 $\pi/2$  モードで運転される。

真空マニホールド

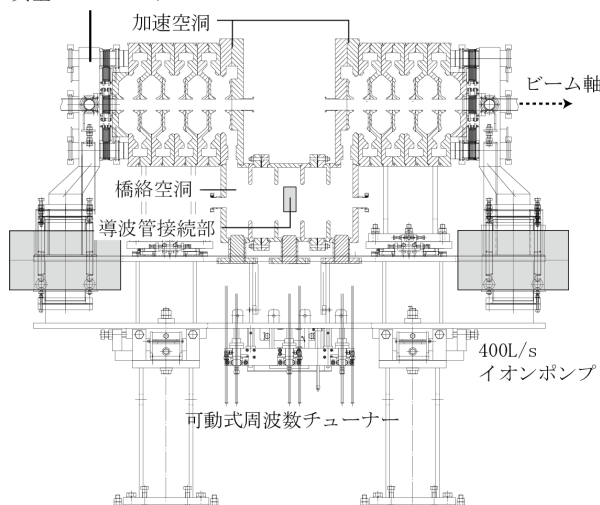


Figure 2: ACS buncher module (based on [9]).

各空洞のセル数は空洞の用途により異なる。バンチャーでは加速空洞は加速セル 5 セル、橋絡空洞は 5 セル(励振セルは 3 セル)である。橋絡空洞はディスクロード型の空洞で、励振セルには可動式周波数チューナーが設けられており、運転時の熱膨張による全体の周波数変化を補正する。

このバンチャーモジュールは、問題なく完成すれば実際のバンチャーとなるものであった<sup>2</sup>。しかし、その製作開始直後の 2002 年の 7 月、予算上の理由からリニアックのエネルギーは 400 から 181 MeV に縮小、ACS の製作と設置は当面延期された。エネルギーの変更前後、400 MeV と 181MeV の J-PARC リニアックの構成を Fig. 3 に示す。

ACS の延期に伴い、開発側の担当は ACS が設置される予定であった区間の電磁石やビームダクトの設計、さらにはリニアックから 3GeV シンクロトロン間の全てのビームラインをも兼任することとなり、やむを得ず空洞開発は約半年間中断された。これ以降、ACS の開発はこれらビームラインの建設、維持

管理と並行して進められることとなる<sup>3</sup>。

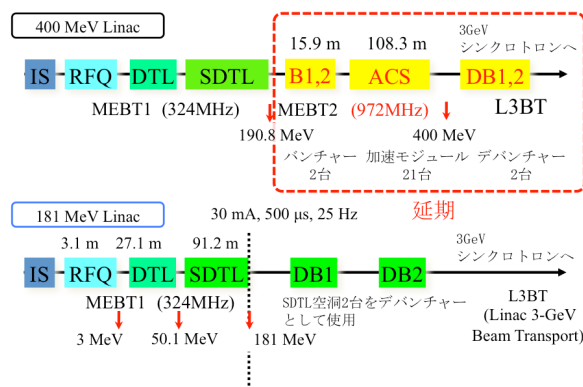


Figure 3: Configuration of the J-PARC linac.

中断から約半年後の 2003 年 5 月、製作が再開された。再開後の主な検討項目として、製造面では

- 加速セル・結合セルの加工精度の確認。量産を想定した三次元測定機による検査手順の自動化。
- 橋絡空洞のコンフラットフランジ形状の検討。
- 空洞本体および架台の強度検討。
- 橋絡空洞を下に配置した架台構造。
- 冷却水配管、真空ポンプサポートの設計。

などが挙げられる。

この時点の検討で、我々は橋絡空洞の位置を JHF ACS の設計であるビームラインの上から下に変更した。この理由は、橋絡空洞部分のドリフトスペースにモニターや収束用の電磁石が設置され、その保守性を優先したためである。橋絡空洞が下になったことで、このドリフトスペースにも、大きな空間を必要とするワイヤースキャナーを設置することが可能となった。

これに関連する設計事項として、ビームライン高さの決定がある。建物の設計段階では、橋絡空洞は JHP ACS 同様、ビームラインより上で考えられていた。そのため高さを決定する経緯でリニアック上流と同一の 1.5 m だったものが、ACS には高すぎるのではないかとの議論があり<sup>4</sup>、最終的に ACS の加速モジュール部分(Fig. 3 参照)より下流側は、床面高さが上流側から 0.3 m 嵩上げされ 1.2 m となった。このような経緯もあり、橋絡空洞が下になったことでビームラインの保守には手が届きやすくなった一方、ACS 架台下部のスペースが非常に厳しくなり、架台の設計や可動式周波数チューナーの保守性は大きく制限されることとなった。

一方、開発面、特に周波数測定および調整方法については、上述の製造面に比べて検討が大きく遅れていた。そこでまず、実寸の無酸素銅製のセルを用いて、

<sup>1</sup> この時点での試作は製作技術の検証が主目的で、高周波測定は付随的な位置づけであった。そのため後述する周波数測定や調整の検討は十分行われなかった。

<sup>2</sup> 当然、成功させなくてはというプレッシャーは大きかった。

<sup>3</sup> マンパワーの問題は当然容易ではなく、最後まで解決しなかった。ただ一生懸命やれば、誰かが助けてくれると思う。良く言われることではあるが。

<sup>4</sup> 超伝導のクライオモジュールを想定しても、高すぎるとの議論があった。この嵩上げのおかげで、震災時、地下水のトンネル内漏水に伴う浸水から免れた。



- 周波数測定方法の検討(Fig. 4 参照)<sup>[10, 11]</sup>。
  - 切削加工による加工量と周波数変化量の確認。
  - ロウ付けによる周波数変化量の実測。
- を順次進めた。

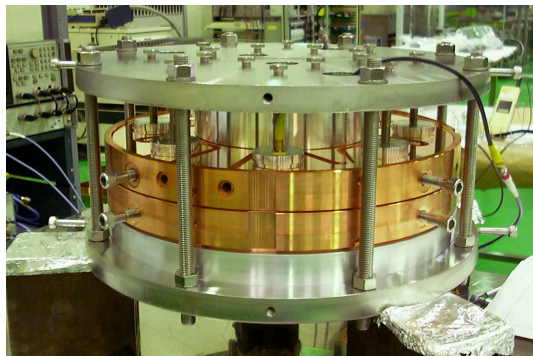


Figure 4: Setup of RF measurement.

この無酸素銅製のセルを用いた試験の主な目的は、再現性よく周波数を測定する方法を確立することであった。そこで、主に締め付けトルクと周波数および Q 値の関係から、高周波的な接触を確保しつつ周波数を測定する手順を調べた。

並行して 1/2 スケールのアルミモデルを用いて、実寸のセルでは実測が困難な

- 橋絡空洞と導波管との結合部分の設計、測定<sup>[12]</sup>。
- 周波数調整加工の試行。複数のセルを組み合わせた場合の全体周波数（全体モード）の測定<sup>[13]</sup>を行った。

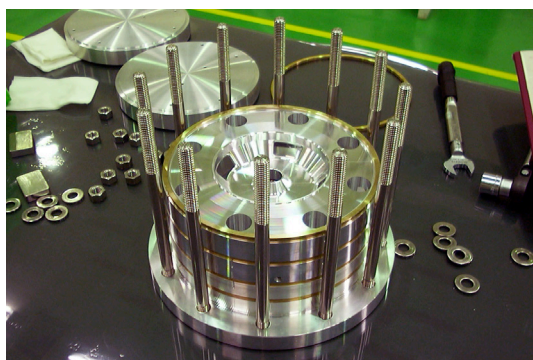


Figure 5: Half-scale aluminum model.

アルミモデルを用いた試験の主な目的は、実際に切削加工で周波数の調整を行ってその変化を調べること、単体の加速セルと結合セルの周波数が多連空洞となったときに、全体の周波数にどのような影響を与えるのかを確かめること、この二つであった<sup>5</sup>。そこで機械加工で実機同様の周波数調整加工を行うと共に<sup>6</sup>、バンチャー空洞と同じ、加速セル 5 セルの空洞を組み立てて各モードの周波数を測定した。

これらの試験の結果を受け、2005 年 5 月に工程の見直しを行い、改めてバンチャー空洞の製作に着手

<sup>5</sup> 原理や計算から予想されることを、モデルを使って確かめた。

<sup>6</sup> 切削工場の協力を頂き、工場内に測定器を持ち込んで測定と調整加工を繰り返した。

した。しかし初号機故、様々な試行錯誤を繰り返しつつの製作となった。

開発面では、橋絡空洞と加速空洞の接続部(Fig. 6)の周波数調整はアルミモデルでも十分な検討が出来ておらず、測定のセットアップから様々な問題が発生した。この部分の測定が難しい理由としては、単純なセルを積み重ねである加速空洞と異なり、Fig. 4 のようなビーム軸方向だけでなく、Fig. 6 の上下方向にも仮組で固定し、高周波的な接触を確保する必要があることが挙げられる<sup>7</sup>。

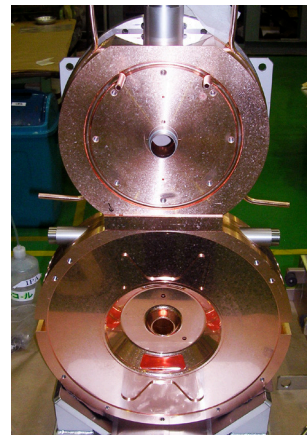


Figure 6: Connecting part between an accelerating tank and a bridge tank.

製造面においても初号機故、製造途中での真空リークなど様々な不具合に直面した。いくつか心配な点も残っていたが、幸い、後の大電力試験では問題は無くコンディショニングできた。現在では加速器トンネルでバンチャー空洞として安定に運転されている。

## 4 加速モジュールの製作

バンチャー1号機の製作におおよそ目処がついた2005年の後半より、ビーム加速に用いるモジュールの1号機[Module 01 (M01)]の製作を開始した<sup>[3]</sup>。モジュールの断面図を Fig. 7 に示す。加速モジュールでは加速セルが 17 セル、橋絡空洞が 9 セルとなり、セル数ではバンチャー空洞の約 3 倍となる。

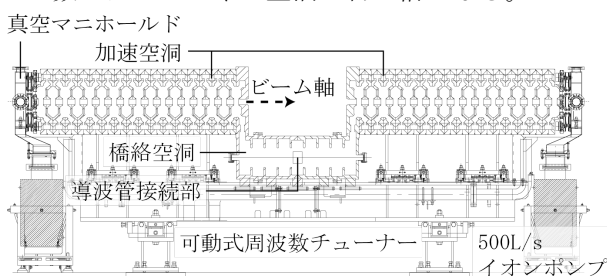


Figure 7: ACS module 01 (based on [3]).

製造面では、初期の試作セル加工の不具合による

<sup>7</sup> そのため、この部分の仮組には、治具の微妙な締め付けの具合など経験が必要とした。量産では経験ある検査員がほぼ専従で対応した。

遅延、最終ロウ付け時のスウェージロック継ぎ手部のリークなどがあったが、概ね順調に進められた。

一方、開発面では、セル数が多くなるため、周波数調整の必要精度はバンチャー空洞よりさらに厳しくなった。バンチャーに比べセル数が多いため、いくつかのグループに分けて段階的に周波数を調整することで、ロウ付けによる組み立て前にほぼ±0.1 MHz の目標範囲に調整することができた<sup>8</sup>。

しかし、組み立て後の電場分布の測定結果は Fig. 8 が示すように、ビーム軸に沿った加速セルの電場振幅に大きな差(最大 11%)が生じてしまった。これはロウ付けによる周波数変化が予想値と異なり、その結果ロウ付け後の周波数が運転周波数 972 MHz と大きくずれたことが原因である(Table 1 参照)。

Table 1: Accelerating-mode and Coupling-mode Frequencies After Final Brazing (MHz)

	加速空洞 1	加速空洞 2
加速モード	972.20	972.18
結合モード	972.78	972.48

Fig. 8 内の青色の点は Table 1 の周波数測定値と等価回路モデルを用いて計算した各加速セルの電場振幅を示す。この計算結果は電場分布の測定値と良く一致していることが分かる<sup>9</sup>。

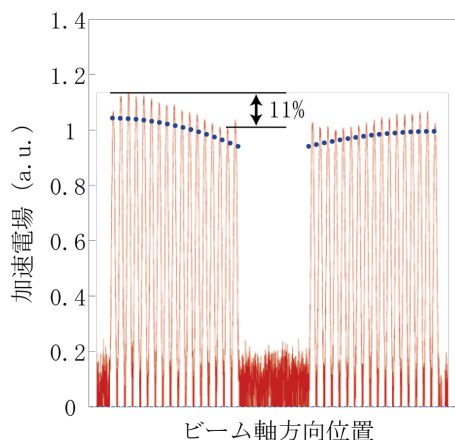


Figure 8: Electric field distribution along the beam axis (based on [3]).

上述の問題はあったが、その後の大電力試験では問題なくコンディショニングでき、所定の電力で安定に運転できることを確認した。また電場振幅の問題についても、大電力運転時には熱膨張により加速空洞の周波数が下がり、最小で電場振幅の差は約 3%まで低減できることがわかった<sup>10</sup>。さらにビームの計算による評価からも許容範囲であると判断され

<sup>8</sup> ただし3ヶ月の期間を要した。このときのいろいろな調整パターンを試行錯誤した経験は、量産時の周波数調整手順の最適化に役立った。

<sup>9</sup> 失敗からは多くのことを学んだ。恥ずかしながら昔からある基本的な理論や計算法はこの時によく理解した。

<sup>10</sup> 冷却水流量を絞って空洞温度を高めにした場合。現在は他のモジュールと同じ流量で運転している。

たことなどから、本モジュール(M01)はそのまま実用機として用いられている。

## 5 量産に向けた改良と量産開始前夜

製造面からの量産に対する最大の課題は、ACS のセルの加工時間を短縮することであった。量産で予定される 21 台のセル数は約 1400 に達し、かつモジュール毎にセル寸法が異なる。従って時間短縮のため仕上げの面粗さを緩和し、また複数ベンダー生産できるような形状に簡略化した<sup>[14]</sup>。

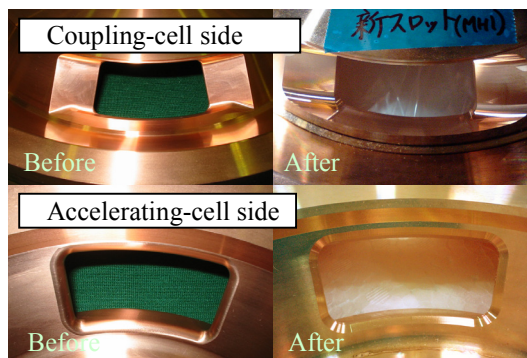


Figure 9: Before (3.3 hour/slot) and after improvement (0.75 hour/slot) of the slot machining (based on [14]).

開発面では、前節で問題となったロウ付けによる周波数変化を補正するため、回転式のチューナーを考案した。Fig. 10 にその原理を示す。結合セルの外周部から翼状の部品(写真ではアルミ製)を挿入しておき、回転角を調整することで、結合セル内の磁場分布を変化させて周波数を調整するものである。最終的には試験空洞を用いた大電力試験で結合セルにパワーを入れ、問題ないことを確認して実機に採用した<sup>11</sup>。

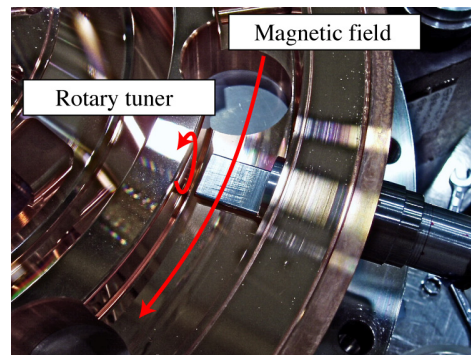


Figure 10: Rotary tuner for coupling-cell frequency tuning<sup>[15]</sup>.

開発と製造の経緯からは外れるが、これらの改良を進めていた 2007 年後半から 2008 年にかけて、ACS の量産は本当に可能かという議論が繰り返しおこなわれた。ここまでに述べたバンチャーと加速モ

<sup>11</sup> 長期的な問題は運転してみないと分からない。不具合発生時に備え、外部から交換できる構造とした。



ジュールの製作に 6 年近くを要した実績に比べ、量産では 21 台を 3 年で製作、4 年目の夏にインストールするという計画の妥当性に厳しいご意見を頂いた。また J-PARC リニアックから SCS の調査に SNS へ出向くという慌ただしさであった。一担当者としては肅々と量産に向けた開発を進めるしかない。心中複雑なまな板の上の鯉の気分であった。

## 6 量産

2008 年度の補正予算でリニアックの 400MeV への回復工事が開始されることとなった<sup>12</sup>。

技術面は先述のスロット加工の改良で、複数ベンダー化が可能となり、橋絡空洞、RF 窓を個別に独立製作などで非常に厳しいが工程面は実現可能などところまで絞り込まれていた。さらに工程が計画的かつ連続的に進むように周波数調整の手順を限られた時間内で確実に終わらせる必要があった。この要求への戦略が“寸法決定用セル”である<sup>16</sup>。

ACS のセルの周波数調整は超精密旋盤を用いた機械加工で行うため、切削量( $\Delta r$ )はマイクロン単位で調整できる。従って、正確に 1 回の修正加工で周波数を調整するためには、どれだけ削れば( $\Delta r$ )どれだけ周波数が変化( $\Delta f$ )するかの係数  $\Delta f/\Delta r$  を正確に把握することが重要となる。そこで、この係数  $\Delta f/\Delta r$  を測定するためだけのセル(4 枚)を量産の最初に全てのモジュールについて製作し、系統的に係数  $\Delta f/\Delta r$  を把握することにした。

この寸法決定用セルをまず量産工程の最初に製作し、その結果を基にして、量産セルの初期寸法を決定した。その結果、周波数調整の加工量を極力少なくし、かつ精度の良い周波数調整が可能となった<sup>13</sup>。

これは製造面においても、全ての形状を最初に一通り製作することで、加工上の不具合などが検証でき、かつ周波数調整が終わった寸法決定用セルは、予備品としての役割も兼ねることができた。実際、寸法決定用セルの初期に平面度が不十分なセルが多数生じ、工程を中断して修正と製造手順へフィードバックが行われた。

量産途中の 2011 年 3 月、東日本大震災により J-PARC 施設は甚大な被害を受けた。J-PARC 施設内で予定されていた大電力試験は量産 1 号機の M04<sup>17</sup>で中断となり、400 MeV へのアップグレードは 2014 年夏へ 1 年延期された。幸い ACS 製造には影響は無く、2010 年に発注された残りの 3 台を含め、大半は予定通り 2013 年 3 月までに完了。最後のモ

<sup>12</sup>異論はあったが、このタイミングの J-PARC にとっては ACS が最適との技術選択であったと理解している。

<sup>13</sup> 製造側から上限 0.3mm、回数 1 回と制限を受けた。「切削量増、回数増、作業分断、修正量指示の遅れは機構の責めに帰するものであり、費用は別途精算するものとする。」と大変厳しかった。実績の無い当時の開発側への期待度はこの文章の示す通りであったと思われる。

ジュールも最終的な 2014 年 3 月迄に納入された。

完成した 25 台の ACS 空洞は 2013 年夏からインストールを開始し、約 1 ヶ月のコンディショニングとビーム試験を経て、2014 年 1 月 400 MeV のビーム加速を確認することができた。

## 7 まとめ

1999 年の設計から 2007 年の加速モジュール初号機までは、製作ではあったが実質的には開発期間であった。量産では、開発面でこの期間に蓄えられた技術と知識が量産に反映できたこと、製造面では開発側と製造側が一体となって大きなプロジェクトに取り組む体制ができたことが、予定通りに量産を進めることができた要因といえる。

## 8 謝辞

長い年月を要したが、紆余曲折を経て最終的に ACS で 400 MeV を達成できたことで、担当として多少なりとも関係者の皆様のご苦勞に報いることができたのではないかと思う。ACS の開発と製造にご協力頂いた本当に数多くの方々、また ACS の開発を見守って頂き、厳しいご指摘や時には励ましを頂いた関係者の皆様に、深く感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- [1] V. G. Andreev et al., Proc. of the 1972 Proton Linac Conf., p.114, 1972.
- [2] E. A. Knapp, B. C. Knapp, and J. M. Potter, Rev. Sci. Instrum. 39, 979 (1968).
- [3] H. Ao et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 051005 (2012).
- [4] T. Kageyama et al., KEK Preprint 89-94, 1989.
- [5] T. Kageyama et al., Proc. of 15th International Linac Conf., LA-12004-C, p. 150, 1990.
- [6] V. V. Paramonov, KEK Report No. 2001-14, 2001.
- [7] S. C. Joshi, KEK Internal No. 2001-6, 2001.
- [8] N. Hayashizaki, et al., Proc. of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 204, 2002.
- [9] H. Ao and Y. Yamazaki, Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 011001 (2012).
- [10] 大型ハドロン計画作業推進作業部会, “大型ハドロン計画陽子リニアック ワーキング・グループ報告 II”, p. 170-175, 1996, KEK Internal 90-16.
- [11] H. Ao, et al., Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 239, 2003.
- [12] H. Ao, et al., Proc. of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, p. 365, 2003.
- [13] H. Ao, et al., Proc. of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, p. 323, 2004.
- [14] H. Ao, et al., Proc. of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 494, 2008.
- [15] H. Ao, et al., Proc. of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 1044, 2009.
- [16] H. Ao, et al., Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 552, 2010.
- [17] H. Ao, et al., Proc. of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p. 1310, 2011.