

## BACK-UP SCENARIO OF J-PARC RCS CAVITY USING FORCED AIR COOLING

Chihiro Ohmori\*, Katsushi Hasegawa, Keigo Hara, Masahiro Nomura, Taihei Shimada,  
Alexander Schnase, Fumihiko Tamura, Makoto Toda, Masanobu Yamamoto, Masahito Yoshii,  
KEK and JAERA J-PARC Center,  
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki 319-1195

### Abstract

J-PARC RCS RF cavities have been operated from 2007. The total operational time is over ten thousand hours. The cavities are operated successfully after a modification to prevent a buckling on MA (Magnetic Alloy) cores which are loaded in the cavities. The MA-loaded cavity can generate a two times higher field gradient than ordinary ferrite-loaded cavities used in other laboratories. For the high gradient operation, the efficient cooling is needed to remove the heat in MA cores. For this purpose, the MA cores were stacked in water tanks and direct water cooling is adopted. At the same time, we proceeded to develop MA cores with improved performance. Recently, a demonstration of large MA core mass production was successful. Eleven MA cores for J-PARC MR and one for RCS were produced. These MA cores have a two times higher impedance than ordinary MA cores which we are using for the present RF systems. Replacement of old MA cores with new high impedance ones will increase the cavity reliability and reduce the cavity power consumption. It is also possible to redesign the cavity to be more compact and to achieve a higher field gradient than the present one. In this paper, we report the performance of the new MA cores and a new cavity design using these high impedance cores. As an option, we also show a back-up cavity design using forced air cooling. The cavity design is considered to fit to the present space in the RCS tunnel without any construction works.

## 強制空冷を用いた J-PARC RCS 空洞のバックアップ案

### 1. はじめに

J-PARC の RCS(Rapid Cycling Synchrotron) と MR(Main Ring) では加速器の小型化と性能向上のために世界で初めて金属磁性体 (Magnetic Alloy) を装填した多数の MA 空洞を使ってビーム加速を行っている<sup>[1]</sup>。金属磁性体空洞は日本で開発されたナノメートルサイズの結晶構造をもつ高透磁率、高性能な磁性材料を用いた空洞である。この空洞は大強度の陽子を加速するために 1995 年から旧東京大学原子核研究所で開発が始まった<sup>[2]</sup> ものを、J-PARC 加速器において磁性体コア製造工程を見直し改良したものである<sup>[3, 4]</sup>。この改良により加速器用において長期に安定して使用できるものとすることができた。例えば数千時間を超える運転後に一部のコアで座屈が発生していたが、更に製造工程を見直すことで、座屈の発生しないコアを開発することに成功した。RCS では毎年、1, 2 台の空洞をこの座屈レスのものに順次置き換えていく予定である<sup>[5]</sup>。RCS 空洞の実現した加速勾配 (単位長さあたりの加速電圧) は他の陽子加速器、とりわけ大口径の必要な RCS 用空洞の 2 倍を超えている (図 1 参照)。J-PARC では高勾配空洞を前提に加速器のラティス設計を行い、RF に必要なスペースを従来のフェライト空洞の半分とすることによって周長 300m 台で 3GeV RCS を設計することができた。

この加速空洞の加速勾配を更に向上させるための開発が進んでいる<sup>[7, 6]</sup>。これは、J-PARC でこれまで使われてきた磁性体を更に高性能なものに置き換えること

で、加速空洞のインピーダンスを上げ、空洞での損失を減らすと同時に、空洞コアの小型化を図ることで空洞本体も小型化し、同じ空洞長さの中でこれまでのの 3 セル構造を 4 セルにすることで、加速電圧と加速勾配を大幅に向上させるものである。このために必要な金属磁性体の開発は J-PARC ハドロンホールにおいて、震災からの復旧作業が進められている中、ハドロングループや低温グループの協力で進められ、短期間の間に 12 枚の高性能磁性体コアを製造することができた。図 2 と図 3 はこの磁性体コアと製造装置である。この製造装置で作られた磁性体コアの特性を図 4 にしめす。この高性能な磁性体製造には強力な磁場が必要なため、高エネルギー原子核実験のために準備された大型の電磁石を、一時的に借用した。この製造装置は現在解体中である。

### 2. RCS 空洞のアップグレード

高性能の金属磁性体を用いることで、加速空洞の 1 セルあたりの長さを縮め 4 セル空洞とすることができる。この時の空洞パラメータを表 1 にまとめた。コア 1 枚あたりのインピーダンスが増加することでセルあたり同じ枚数の磁性体コアを使用すると、セルあたりのインピーダンスも増加する。これにより、現状と同じ冷却方式であれば、セルあたりの電圧を増やすことができる。ここでは冷却方法として現在採用されている直接冷却を採用している。直接冷却では磁性体コアを防錆樹脂とガラスクロスでコーティングし、直接純水で冷却をおこなっている。RCS ではこの方式を用いた空洞が 2007 年から稼働している。途中、次の 2 つの点について製造

\* chihiro.ohmori@kek.jp

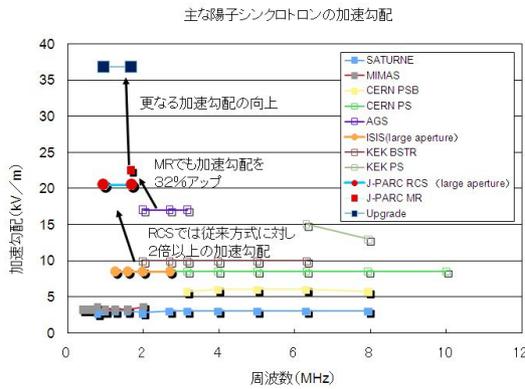


図 1: 世界の主要な陽子加速器の加速空洞の勾配。従来までのフェライトを装荷した空洞では、磁性体の飽和により加速勾配は 15kV/m 程度までであった。大きなビームパイプ径や幅広い周波数帯域などの制約がある場合、更にフェライト空洞の加速勾配は低下する。

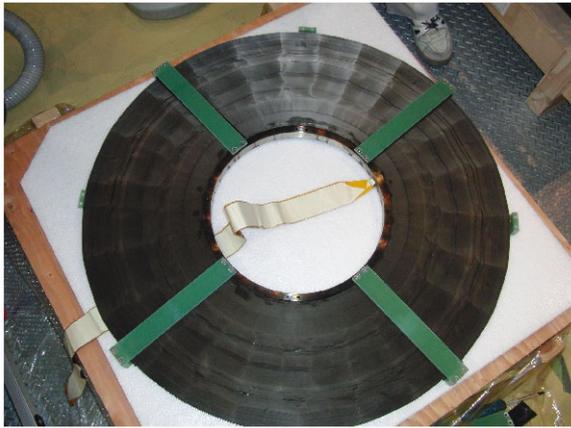


図 2: J-PARC で製造された高性能な磁性体コア。直径 85cm, 内径 375mm の RCS 用実機サイズである。厚みは 2.5cm であり、現行のもの (3.5cm) に比べると薄くなっているが、 $\mu Qf$  値がほぼ 2 倍高いためインピーダンスは増加することとなる。コアの厚みを薄くすることは磁性体の冷却の観点からも望ましい。

工程を大幅に見直している [3, 4]。

- 磁性体コアを形成している厚さ 18  $\mu\text{m}$  のリボンに塗布されている厚さわずか 2  $\mu\text{m}$  のシリカ絶縁膜が製造工程の途中で破損し、コアの耐電圧が低下した。これに対し、製造過程での絶縁膜の状態を確認すること、作業中の磁性体コアの扱い方を注意することで耐電圧の低下を防ぐことができた
- 磁性体コアの機械的強度を高め、冷却水の侵入を防ぐために含浸していた低粘度エポキシ樹脂がコアの温度上昇により座屈を起こすことが分かった。製造工程からこれを取り除き、防錆コーティングのみとすることで、コアに柔軟性を持たすことで座屈を防ぐことができた。

これらの改良により、RCS 空洞のアップグレードの際最も確実な冷却方式は現行の直接冷却であると考えている。RCS で加速に必要な電圧は MR のビーム増強な

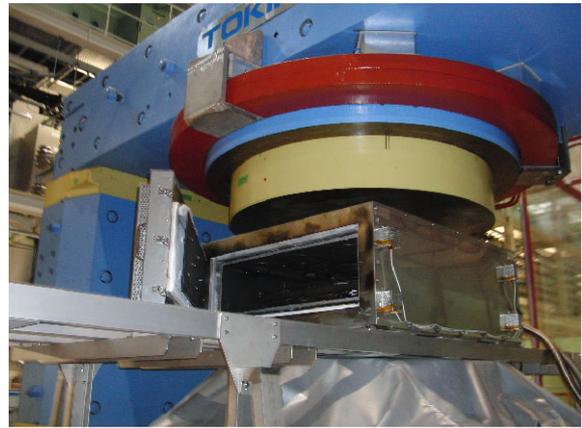


図 3: 高性能な磁性体コアの製造装置。旧原子核研究所の FM サイクロトロン用電磁石の磁極間に大型の熱処理炉が設置されている。震災後の短期間に J-PARC ハドロングループと低温グループの協力により、空洞試験に必要な枚数の磁性体コアが製造された。

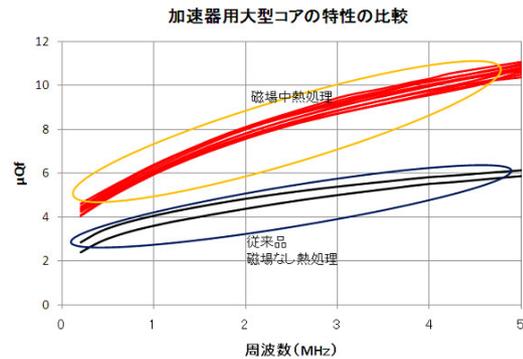


図 4: J-PARC で製造された高性能な金属磁性体の特性。同じ製造条件で作った磁性体コア (FT3L) はほぼ同じ特性を示している。従来の磁性体コア (FT3M) に比べ、ほぼ倍の特性を持つことが分かる。

ど将来必要になる性能を考慮しても 450kV 程度であるため、現行の空洞のごく一部 (1, 2 台) を置き換えることにより、故障時の予備も含んだ運転が可能となる。この直接冷却方式で設計した 4 セル空洞を図 5 に示す。

### 3. RCS 空洞のバックアップシナリオ

金属磁性体空洞の技術的開発の多くは J-PARC で行われたものである。技術的にも世界をリードしていると言える半面、この空洞システムで発生する問題を自分たちで解決することが求められる。直接冷却方式は、冷却効率の点で最も優れており、使用する冷媒が純水であるため容易に保守することができる。また、現在使われている防錆エポキシ樹脂 + ガラスクラスの組み合わせは生産技術的に確立されており、安定した製品の品質を維持することができる。RCS 空洞は現状、安定に稼働しているが、今後予想しない問題が発生する可能性も否定できない。特に直接冷却とコーティングに本質的に関連した問題に対処するため、別の冷却方式を含んだバックアップシナリオを検討しておく必要

表 1: RCS 空洞のアップグレード

	Present System	Upgraded System
Cavity Length	1950 mm	1950 mm
Number of cells	3	4
Voltage / cell	12.7 kV	15 kV
Total Voltage	38 kV <sup>a)</sup>	60 kV
Field Gradient	19.5 kV/m	30.7 kV/m
Impedance / cell	800 Ω	1100 Ω
Number of MA cores	6 /cell	6 /cell
Thickness of MA core	3.5 cm	2.5 cm
Power Dissipation / cell	30.1 kW	30.6 kW

a) Voltage during operation. A new cavity was tested with 45 kV before installation.

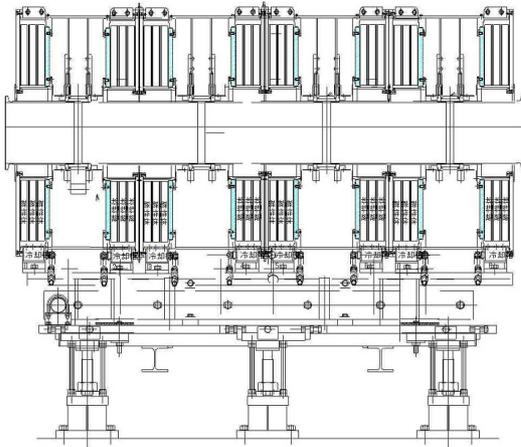


図 5: 4 セル構造の RCS 空洞のアップグレード案

がある。別方式のバックアップシナリオとしては次の点を考慮する必要がある。

- 現状以上の加速空洞としての性能を持つこと。
- 現在の RCS 建屋、トンネルに合理的に収まること。
- トンネル内で安全に使用できること。可燃性、有毒性または反応性の化学成分を含まないこと。騒音が許容範囲であること。
- 現在の電源、増幅器で運転できること。
- コストが現状以下であること。

これらの条件を満足するものとして、空冷空洞を検討している。空冷方式はフェライト空洞では CERN の PSB(PS Booster) 空洞<sup>[8]</sup>、MA 空洞では KEK の PS Booster<sup>[9]</sup> の加速器通常運転に使用された実績がある。図 5 は空洞の構造を示している。現状の直接水冷と比べたものが表 2 である。空冷空洞は 4 セル構造であり、加速電圧は 40kV である。空冷空洞の特徴はセル数を増やすことでセルあたりの電圧を下げ且つ多くの磁性体コアを装荷することでセルあたりのインピーダンスを高くして、発熱を抑えている点である。これにより、冷却能力の劣る空冷方式で高勾配を実現しようとしている。コア 1 枚当たりの発熱量は直接水冷の 6 分の 1 ま

で減少し、1kW を切っている。またコストの面でも防錆コーティングが不要となるため、磁性体コアの枚数が増加するにも関わらず磁性体のコストは減少する。図 6 に示すように風の流れは磁性体コアの内側から外側に向けコアとコアの間を流れている、これは前述の 2 台の空冷方式<sup>[8,9]</sup>と同じ流れ方である。冷却に必要な風量はセルあたり 0.7m<sup>3</sup>/秒、コアの内側付近の風速は 10m/秒である。この風速はセルごとに送風機を用意することで解決できると考えられている。必要な送風機と熱交換器の大きさを図 7 に示す。送風機を空洞に直結することで、現在の RCS トンネル(図 8)に無理なく納めることができる。この送風機の騒音は 75dB 程度であるが、更に防音箱の中に収納することにより、騒音を減らすことができる。

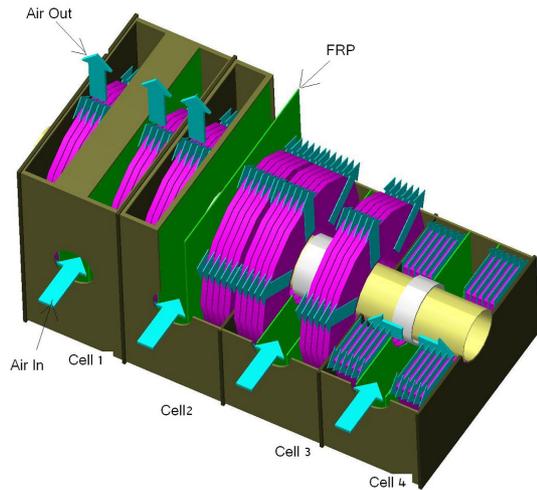


図 6: RCS 空洞のバックアップ案。4 セル空洞の内部が分かるようにしている。水色の矢印は風の流れを表している。各セルの中央部から入った風は FRP 板により磁性体コアの内側へと導かれる。そこからコア間の約 5mm の隙間から放射状に流れ、コアの表面から冷却する。加熱された空気は空洞の上下にある熱交換器(図 7)により冷却され再度冷却に使われる。

表 2: RCS 空洞のバックアップ案

Cooling Scheme	Direct Water	Forced Air
Cavity Length	1950 mm	1950 mm
Number of cells	3	4
Voltage / cell	12.7 kV	10 kV
Total Voltage	38 kV	40 kV
Field Gradient	19.5 kV/m	20.5 kV/m
Impedance / cell	800 Ω	1800 Ω
Number of MA cores	6 /cell	10 /cell
Thickness of MA core	3.5 cm	2.5 cm
Power Dissipation / cell	30.1 kW	8.3 kW
Power Dissipation / core	5.0 kW	0.8 kW
Max. Temperature in core	90 °C	100 °C

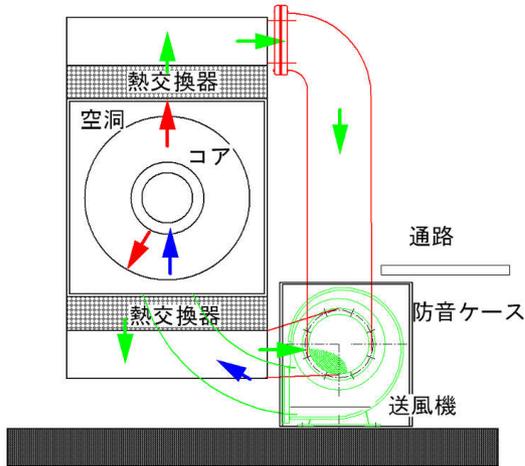


図 7: 空冷空洞の冷却。送風機は防音のため 75cm 角の防音ケースに収納される。空洞の上下には熱交換器を設置し、約 65 度に暖められた空気 (赤色矢印) を 40 度まで冷却した後 (緑色矢印) 送風機まで戻され、再度空洞へと送られる (青色矢印)。送風機の風量は最大 50m<sup>3</sup>/分である。送風機は現在の通路の下に収まる。

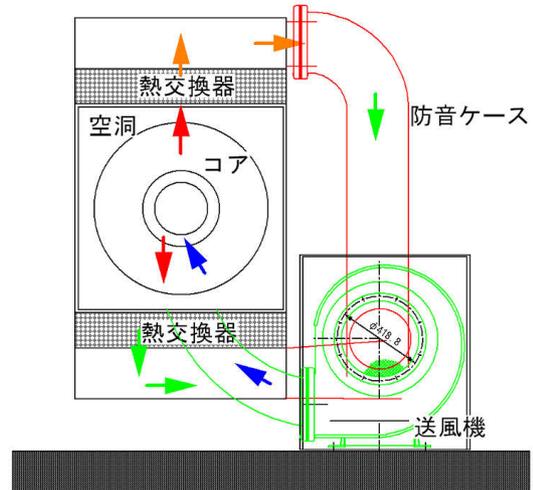


図 9: アップグレード案と同程度の性能を出すために必要な空冷システム。より大型の送風機が必要となる。

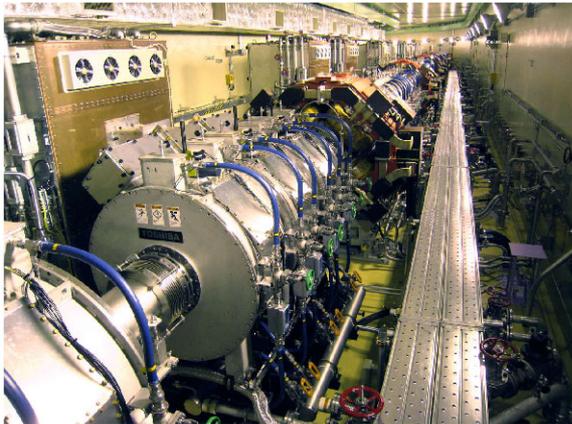


図 8: RCS トンネル内に設置されている RF 空洞。空冷空洞の冷却に必要なブローは写真右側の通路の下に納めることができる。

この空洞は送風機を大型にすることで前述のアップグレード案と同程度の性能を出すことができる。この場合必要となる風速と風量は約倍となり、風速 20m/秒、1.5m<sup>3</sup>/秒の風量が必要となる。したがって、この場合の送風機は図 9 のように大型のものとなり、現在の空洞、アンプの冷却水系と干渉するため、運転維持・補修方法の再構築が必要となる。

#### 4. まとめ

J-PARC RCS の RF 空洞は順調に稼働している。営業運転中に発生した問題は原因を調査し、製造工程を改良することにより、長期信頼性を高めている。最近、製造することに成功した高性能な大型磁性体コアを空洞に用いることにより、空洞のアップグレード設計を行っ

た。この金属磁性体を用いた空洞はまだ歴史が浅いため、現在採用されている直接冷却方式の根幹に係る問題が発生した場合に備え、強制空冷を利用した空洞設計を行った。この設計では現在のトンネルに収まること、安全であること、低コストであることなどの必要な条件を満足することができた。

#### 参考文献

- [1] M. Yoshii *et al.*, PROTON BEAM ACCELERATION WITH MA LOADED RF SYSTEMS IN J-PARC RCS AND MR SYNCHROTRONS, *Proceedings of PAC09, Vancouver, BC Canada, p770-772* (2009).
- [2] C. Ohmori *et al.*, HIGH FIELD-GRADIENT CAVITIES LOADED WITH MAGNETIC ALLOYS FOR SYNCHROTRONS *Proceedings of PAC99, New York, U.S.A., p413-417 (invited)* (1999).
- [3] M. Yamamoto *et al.*, HIGH POWER TEST OF MA CAVITY FOR J-PARC RCS *Proceedings of PAC07, Albuquerque, NM U.S.A., p1532-1534* (2007).
- [4] M. Nomura *et al.*, CONDITION OF MA CORES IN THE RF CAVITIES OF J-PARC SYNCHROTRONS AFTER SEVERAL YEARS OF OPERATION, *Proceedings of IPAC10, Kyoto, Japan, p3723-3725* (2010).
- [5] M. Nomura *et al.*, J-PARC シンクロトロン RF 空洞のインピーダンス測定, *in this proceedings* (2011).
- [6] C. Ohmori *et al.*, DESIGN OF A NEW J-PARC RF CAVITY FOR SHORT MUON BUNCH *Proceedings of PAC09, Vancouver BC, Canada, p876-878* (2009).
- [7] C. Ohmori *et al.*, DEVELOPMENTS OF MAGNETIC ALLOY CORES WITH HIGHER IMPEDANCE FOR J-PARC UPGRADE *Proceedings of IPAC10, Kyoto, Japan, p3711-3713* (2010).
- [8] U. Bigliani *et al.*, THE RF ACCELERATING SYSTEM FOR THE CERN PS BOOSTER *Proceedings of PAC71, p273-276* (1971).
- [9] S. Ninomiya *et al.*, NON-RESONANT ACCELERATING SYSTEM AT THE KEK-PS BOOSTER, *Proceedings of EPAC04, Lucerne, Switzerland, p1027-1029* (2004).