

## サイクロトロンの高エネルギー効率化に向けた検討

### STUDY FOR IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF CYCLOTRONS

武田佳次朗<sup>#, A)</sup>, 福田光宏<sup>A)</sup>, 神田浩樹<sup>A)</sup>, 依田哲彦<sup>A)</sup>, 篠塚勉<sup>B)</sup>, 伊藤正俊<sup>B)</sup>,  
倉島俊<sup>C)</sup>, 宮脇信正<sup>C)</sup>, 涌井崇志<sup>D)</sup>, 松田洋平<sup>E)</sup>, 中尾政夫<sup>F)</sup>, 安田祐介<sup>A)</sup>, 原隆文<sup>A)</sup>  
Keijiro Takeda<sup>#, A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>, Hiroki Kanda<sup>A)</sup>, Tetsuhiko Yorita<sup>A)</sup>, Tsutomu Shinozuka<sup>B)</sup>,  
Masatoshi Ito<sup>B)</sup>, Satoshi Kurashima<sup>C)</sup>, Nobumasa Miyawaki<sup>C)</sup>, Takashi Wakui<sup>D)</sup>, Yohei Matsuda<sup>E)</sup>,  
Masao Nakao<sup>F)</sup>, Yusuke Yasuda<sup>A)</sup>, Takafumi Hara<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

<sup>B)</sup> Cyclotron and Radioisotope Center, Tohoku University

<sup>C)</sup> Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

<sup>D)</sup> Institute for Quantum Medical Science, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

<sup>E)</sup> Konan University

<sup>F)</sup> Gunma University Heavy Ion Medical Center

#### Abstract

In general, a cyclotron has relatively higher energy efficiency than other types of accelerator due to compactness and simplification of magnets and RF systems. The maximum energy efficiency of 13 % was achieved at PSI-HIPA. The power losses in electromagnets and RF systems account for 70 % of the total power consumption. The energy efficiency of a cyclotron will be improved by introducing power saving measures such as superconducting equipment and electric-power free devices. We started designing of a new cyclotron consisting of main electromagnets using SmCo permanent magnets (PM) and superconducting RF (SRF) cavities coated with MgB<sub>2</sub> to achieve energy efficiency of 30 % or more. Key technologies required for realization of an SRF system in a cyclotron are manufacturing of an MgB<sub>2</sub> superconducting cavities and its cryomodels. Especially the leakage field of the main magnets around the superconducting cavities should be tolerable by reducing the field under the thermodynamic critical field. In this paper, we have identified the R&D issues for each element as the first step in the development of our high energy-efficiency SRF-PM cyclotron.

#### 1. はじめに

大阪大学核物理研究センター(RCNP)では、原子核物理実験、医療用 RI 製造、半導体ソフトエラー評価中性子生成などの多目的なビーム利用の需要を満たすため、サイクロトロンの大強度化および高エネルギー効率化に向けた要素開発に取り組んでいる。具体的には、数 10~100 mA 級正/負イオン源の開発とサイクロトロンにおける負イオン加速の高効率化、空間電荷効果を考慮した透過効率の高い入射ビーム輸送法の開発、mA 級の高強度負イオンビームを安定的に取り出せる荷電変換引出方法の開発、消費電力を減らせる永久磁石型電磁石と超伝導加速空洞の設計などを CYRIC, QST, GHMC と共に進めてきた[1, 2, 3]。

サイクロトロンはエネルギー効率が優れた加速器であり、PSI-HIPA(590 MeV, 2.2 mA)リングサイクロトロンは 13 %を達成している[4]。各要素の効率を Table 1 にまとめた[5, 6]。PSI-HIPA は常伝導電磁石と常伝導加速空洞を使用しているものの、各要素で高い電力変換効率を実現している。Table 1 において、 $\eta_{DC}$  は交流電源を DC 電源に変換する効率のことで、一般的には 80~90 %の

Table 1: Accelerator Efficiencies for PSI-HIPA [5] and Our Goal of SRF Cyclotron

Efficiency		PSI-HIPA	our goal
AC to DC	$\eta_{DC}$	90 %	90 %
DC to RF power	$\eta_{RF}$	64 %	70 %
RF power to Beam	$\eta_{beam}$	55 %	87 %
other components	$\eta_{other}$	41 %	55 %
Total	$\eta_{acc}$	13 %	30 %

値をとり、HIPA では 90 %となる。次に $\eta_{RF}$ は DC から RF への電力変換効率で、RF 周波数が 300 MHz 以上の場合はクライストロンが使われているが、サイクロトロンでは真空管もしくは半導体アンプが使われている。また、 $\eta_{beam}$  は加速空洞のシャントインピーダンス  $Z = V_0^2/P$  に比例しており、常伝導加速空洞の場合には空洞でのパワーロスが大きくなるため HIPA では 55 %、常伝導 LINAC である SNS(1 GeV, 1 MW)は 17 %という値になっている。空洞を超伝導化すると空洞ロスがほぼゼロになり、加速時以外の位相での消費電力程度

<sup>#</sup> kjtakeda@rcnp.osaka-u.ac.jp

となり $\eta_{\text{beam}}$ はSNSの超伝導LINACの場合で87%という非常に高い値を実現している。そして、加速空洞以外の要素(電磁石, Cryomodule などの冷却システム)による電力変換効率 $\eta_{\text{other}}$ を掛け合わせることで加速器全体のエネルギー効率を求めることができる。

そこで本研究では、サイクロトロンにおいて消費電力割合が最大である加速空洞を超伝導化することで空洞の表面ロスを大幅に減らし、 $\eta_{\text{beam}}$ を超伝導LINAC並にすることでエネルギーを30%まで向上させることを目指す。Table 1において $\eta_{\text{other}}$ はHIPAよりも高い値となっているが、永久磁石化させることで電磁石での消費電力をゼロにできれば実質Cryomoduleの効率だけとなる。SNSの超伝導LINACにおいて62.5%を達成している[5]ことから $\eta_{\text{other}}=55\%$ は達成可能性がある効率だと考えている。本論文では、超伝導RFと永久磁石を組み合わせたサイクロトロン(Superconducting RF and Permanent Magnet Cyclotron, SRF-PM Cyclotron)を開発する第1段階として、主要素である超伝導加速空洞・Cryomodule・永久磁石型電磁石の設計課題について取り上げる。

## 2. SRF-PM Cyclotron の設計課題

### 2.1 超伝導物質の選択

単体金属であるNb以外の超伝導物質を加速空洞に応用する場合、空洞内面に超伝導薄膜を成膜(蒸着)させて製造される。そのため超電導コイルのような複雑な組成および構造をもつような物質は使えず、主にTable 2に挙げた4種類が使われている。Nb製超伝導加速空洞はSRF LINACで実用化されており、NbNとNb<sub>3</sub>Sn製超伝導加速空洞の研究開発も盛んに行われてきた。Nb<sub>3</sub>Snは加速電圧の理論的限界値の基準となる熱力学的磁場がNbの2倍以上であるため同温度でNbの2倍以上の加速電圧が得られると期待されている。しかし、運転温度はHe温度(4.2~1.8 K)を想定されており高い加速電圧が得られるのに対してCryomoduleの冷凍コストが非常に大きくなる。

Table 2: Properties of Superconducting Materials Applied in SRF Cavities

Material	$T_c$ [K]	$H_{c1}$ [T]	$H_{sh}$ [T]
Nb	9.23	0.18	0.24
NbN	16.2	0.02	0.23
Nb <sub>3</sub> Sn	18	0.05	0.54
MgB <sub>2</sub>	39	0.03	0.43

逆カルノーサイクルにおける冷凍機のカルノー効率 $\eta_{\text{carnot}}$ をFig. 1に示す。 $\eta_{\text{carnot}}$ は冷却温度 $T_c$ で生じた1 Wの熱量を外部( $T_h=300$  K)に逃がすために必要な仕事量を表しており、以下の関係にある。

$$\eta_{\text{carnot}} = (T_h - T_c) / T_c$$

また、冷凍コストは冷却温度に反比例して大きくなり、現実的な値は $\times 3.3$ よりも大きな値となる[7]。従って、L-H<sub>2</sub>温度下では $\eta_{\text{carnot}} > 1$  kW/Wと非常に大きくなるため、

一般的なCryomoduleには外気300 KとL-He温度の間にL-H<sub>2</sub>温度(77~80 K)の熱シールドが追加されるものの運転温度は高いほど得られる加速電圧は小さくなるが冷凍コストは小さくできる。

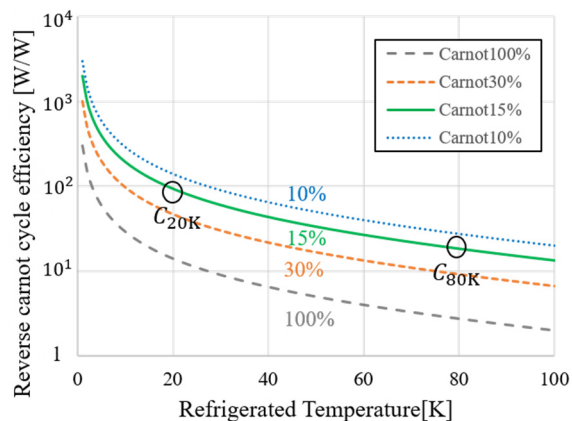


Figure 1: Reverse Carnot Cycle Efficiency Curve.

さらに、サイクロトロン加速空洞は常に漏洩磁場に晒されるため熱力学的臨界磁場は大きいことが望ましい。サイクロトロン加速空洞の超伝導化を試みたTRITRON計画[8, 9]やTAMU[10, 11]では漏洩磁場によるクエンチを避けるために、リングサイクロトロンを採用している。加えて、サイクロトロンはLINACのようなGHz帯ではなく数十MHzのRF周波数であるため空洞サイズが1辺1mを超える。そのため、Nbのような貴金属は製造コストが莫大になると予想されることから、材料コストが低い超伝導物質が望ましい。

以上のように冷却コスト低減のためにL-He温度以上の運転温度の実現が可能な臨界温度と、サイクロトロン漏洩磁場対策として大きい熱力学的臨界磁場を持ち、材料コストも小さい超伝導物質として、本研究ではMgB<sub>2</sub>を選択した。MgB<sub>2</sub>は2001年に超伝導性が発見された物質であるため超伝導加速空洞への研究の歴史は浅いが、LANL[12]やTemple大[13]で精力的に進められている。

### 2.2 SRF-PM Cyclotron の設計課題

SRF-PM Cyclotronの概要図をFig. 2に設計目標値をTable 3に示す。

K値は100 MeVの陽子加速で、PSIやSNSと同様の1 MW ビーム出力を目指し、かつエネルギー効率をPSIよりも高い効率を設計目標とする。MgB<sub>2</sub> SRF Cavityの運転温度は20 Kとし、L-H<sub>2</sub>冷却または伝導冷却を目指すのが70 MHz近くの巨大な空洞を冷やすことができるかが課題である。また、一般的にサイクロトロンの設計プロセスは、磁場計算により加速粒子の等時性磁場を満たす電磁石を設計したのち、Valleyに挿入可能な形状の加速空洞を設計することが多い。しかし、SRF Cyclotron設計の難関はCryomoduleと加速空洞をValley部に挿入させることであるから、本研究ではCryomoduleと超伝導加速空洞の設計を先だてて実施し、セクター磁石の設

計は最後に行う。Cryomodule のサイズはふく射熱と挿入パーツ(カプラや空洞の支台)の熱伝導のトレードオフであり、特に周方向の空間的自由度は非常に小さくシビアな条件が求められるだろう。加えて、そのサイズによってはセクター磁石の対称性(一般的には軸対称)が失われる可能性もあるため、磁場の安定性を上げるための工夫も必要になるに違いない。

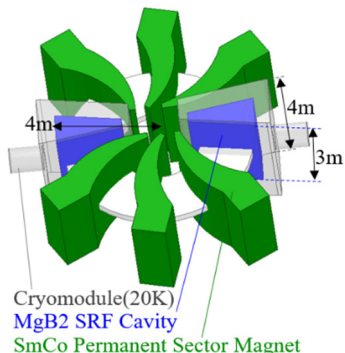


Figure 2: K100 SRF Cyclotron components.

Table 3: Design Target Values of K100 SRF-PM Cyclotron (provisional)

Particle	Proton
Beam power	1 MW (100 MeV × 10 mA)
RF frequency	69.4 MHz
Harmonics	10
Height	2.2 m
Radius	Injection: 1.0 m Extraction: 3.0 m
Magnetic Field	Extraction: 0.494 T Leakage at SC layer : ~ 0.03 T
Operation temperature (cooling methods)	20 K (L-H <sub>2</sub> or conduction cooling)

### 3. まとめ

サイクロトロンエネルギー効率の更なる向上のため、MgB<sub>2</sub> 超伝導加速空洞と SmCo 永久磁石を組み合わせ消費電力を極限まで減らし、エネルギー効率 30% を達成しうる SRF-PM Cyclotron の設計を開始した。これまで、SRF-PM Cyclotron 設計に向けた各要素の課題を議論してきたが、Table 4 に主要素である Cryomodule と超伝導加速空洞、セクター永久磁石の設計課題をまとめた。今後は、RCNP が所有する多数のシミュレーションコード(OPERA-3D, ANSYS/HFSS, FloEFD, OPAL など)を使用して詳細設計を進めていく。

Table 4 : Design Main Issues of SRF-PM Cyclotrons

<b>1. Cryomodule</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 運転温度 20 K を維持する冷却法(L-H<sub>2</sub>, 伝導冷却)</li> <li>• ふく射/熱伝導/熱接触による発熱を最小化できる構造</li> <li>• 周方向のサイズを最大限減らす構造</li> </ul>
<b>2. 超伝導加速空洞</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 超伝導層の基板の決定</li> <li>• MgB<sub>2</sub> 薄膜の許容される残留抵抗値と加速電圧</li> <li>• ビーム透過効率を向上させる(空洞表面での衝突防止)</li> <li>• 伝導熱を最小化する挿入パーツの配置</li> <li>• 運転に適した周波数帯の選択</li> <li>• 外部磁場下での MgB<sub>2</sub> 薄膜の RF 特性試験</li> </ul>
<b>3. 永久磁石型セクター磁石</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cryomodule と加速空洞を挿入可能な条件(空間的自由度、漏洩磁場)を満たす配置・磁場分布の決定</li> <li>• 磁気シールドと Field clamp による漏洩磁場抑制機構</li> <li>• SmCo の小型モデル磁石の製作/試験[1]</li> </ul>

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20H04454 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] <https://kaken.nii.ac.jp/grant/KAKENHI-PROJECT-20H04454/>
- [2] OPERA-Qiss Program; <https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~qiss/overview2.html>
- [3] M. Fukuda *et al.*, “ImPACT における核変換用加速器開発の進展(5)中小型サイクロトロンを用いた核変換システムの概念設計”, AESJ2018, Japan, Sep. 5-9, 2018.
- [4] J. K. Grillenberger, “Energy Efficiency of Cyclotrons”, CYC2016; [https://accelconf.web.cern.ch/cyclotrons2016/talks/tha01\\_talk.pdf](https://accelconf.web.cern.ch/cyclotrons2016/talks/tha01_talk.pdf)
- [5] M. Haj Tahar *et al.*, “Energy Efficiency of High Power Accelerators for ADS Applications”, Proceedings of IPAC2016.
- [6] Andras Kovach, Angelina Parfenova, “Energy Efficiency Analysis and Optimization of HIPA Power Consumption”; [https://www.psi.ch/sites/default/files/import/enefficient/DocumentationEN/Analysis\\_and\\_Optimisation\\_of\\_HIPA\\_Power\\_Consumption-20161214.pdf](https://www.psi.ch/sites/default/files/import/enefficient/DocumentationEN/Analysis_and_Optimisation_of_HIPA_Power_Consumption-20161214.pdf)
- [7] V. Parma, “Cryostat Design”, CERN; <http://cds.cern.ch/record/1974062/files/arXiv:1501.07154.pdf>
- [8] U. Trinks, “The Superconducting Separated-orbit Cyclotron TRITRON”, CYC1995; <https://accelconf.web.cern.ch/SRF93/papers/srf93b08.pdf>
- [9] H. Okuno, “サイクロトロン超伝導化”, 日本加速器学会, 「加速器」Vol.16, No.14, 2019, pp.310-319.

- [10] N. Pogue *et al.*, “Superconducting RF Cavity for High-current Cyclotron”, IPAC2012;  
<https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2012/papers/weppc063.pdf>
- [11] L. Calabretta, “Cyclotrons and FFAG Accelerators as Driven for ADS”, BNL-111770-2016-JA, 2016.
- [12] T. Tajima, “R&D on MgB<sub>2</sub> at LANL for Applications to Superconducting RF Cavities”, a seminar at KEK, 2020.
- [13] T. Tan, “Application of superconducting MgB<sub>2</sub> in superconducting radio frequency cavities”, Temple Univ. 2015, Ph. D thesis.