

# DEVELOPMENT OF AN RF ACCELERATING STRUCTURE LOADED WITH MULTI-RING MAGNETIC CORES COOLED BY A CHEMICALLY INERT LIQUID

Yuichi Morita <sup>#A)</sup>, Tatsuya Kageyama<sup>A)</sup>, Jun Kameda<sup>B)</sup>, Satoru Yamashita<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo

5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8582

<sup>C)</sup> International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

## Abstract

In order to enhance the beam power of the J-PARC ring accelerators (RCS and MR), the accelerating structures need to be upgraded. As a solution for this purpose, we proposed a new accelerating structure loaded with multi-ring core modules. The core module consists of three ring FINEMET cores concentrically arranged and sandwiched between two glass epoxy plates, which have flow channels grooved on the surfaces. The Fe-based cores are cooled with the turbulent flow of Fluorinert (chemically inert perfluorinated liquid). Therefore, the cores are neither impregnated nor coated with epoxy resin. We built a prototype RF structure loaded with one core module. We directly measured the temperatures on the core surfaces in high power testing, and estimated the heat transfer coefficient. We confirmed that the experimental results satisfied our design values. In addition, we performed the withstand voltage test of a core, and didn't observe any discharges on the surfaces.

## 不活性冷媒液冷式・マルチリング磁性体コア装荷高周波加速構造の開発

### 1. はじめに

J-PARC リング加速器の加速構造にはファインメットコアが使用されている。日立金属株式会社において開発されたファインメットは優れた磁気特性を持つ金属磁性体である。従来のフェライトコア装荷型加速構造と比べて、ファインメットコア装荷型加速構造は2倍以上の加速勾配が期待できる<sup>[1]</sup>。

しかし、現行の RCS (Rapid-Cycling Synchrotron) 用コア水冷式加速構造では長時間運転中に熱応力によりある種のいくつかのコアが座屈し、インピーダンスが低下する現象が発生した<sup>[2]</sup>。この種の問題を含め、加速構造の長期不安定性を解決し、加速器運転の安定化・増強に資するために、新型の加速構造を提案し、開発中である。新型加速構造は以下の2つの特長をもつ。

- ◆ コアをマルチリング形状とし、それぞれのコアを素コア（機能材としてのコアに一切手を加えないという意味である）とする。
- ◆ 冷媒をフッ素系不活性液体であるフロリナートとし、高い熱伝達係数（冷却効率を上げる）を達成すべく乱流域で使用する。

本稿では、試験構造を用いた大電力試験、及びコアの耐電圧試験を行った結果について報告する。

### 2. マルチリングコア加速構造

#### 2.1 マルチリングコア

新しく開発する加速構造にはマルチリング形状のファインメットコアが装荷される。マルチリングとは、図1に示すように、従来のコアを径方向に3分割したコア形状である。

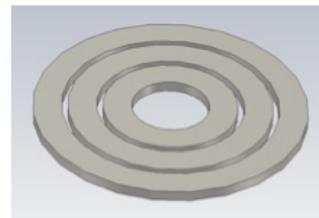
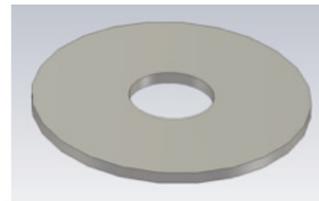


図1：マルチリングコア（下）。従来のコア（上）を径方向に3分割している。

小、中、大コアから構成され、各コアの巻厚は81mmとした。これらのコアにはエポキシ樹脂含浸もしくは防錆コーティング等を一切施していない

<sup>#</sup> yuichi.morita@kek.jp

(素コア)。マルチリングコアは以下の利点をもつ。

1. 巻厚を抑えることにより、ファインメット薄帯の巻締りが改善し、磁気特性の向上が期待できる。また、コアの構造が安定する。
2. 組立時に機能材（磁性体）・構造材（ステンレス巻芯）の使い分けが可能となる。

素コアは以下の利点を持つ。

1. 金属磁性薄帯を巻いたままの柔構造なので、コア内の熱応力が緩和され（約2桁）<sup>[4]</sup>、座屈を防ぐことができる。
2. 含浸樹脂のガラス転移温度により使用温度が制限されない。
3. 冷媒による直接冷却が可能。
4. コア内、表面の放電生成物に対する自己清浄化作用（冷媒中の拡散、冷媒の流れによる輸送）が期待される。

マルチリングコアを流路の彫り込まれた2枚のガラスエポキシ（G10）板で挟み込んで一体化した構造をコアモジュールと呼ぶ。コアモジュールの断面図を図2に示す。板はステンレスカラーのみに接し、コアにストレスをかけることなく組み立てることができる。板とコア表面の隙間が流路となり、冷媒が流れる<sup>[3]</sup>。

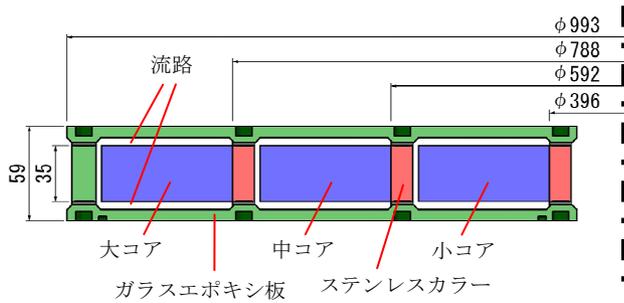


図2：コアモジュールの断面図<sup>[3]</sup>

## 2.2 フロリナート

コア（鉄系合金）の腐食を避けるために、冷媒としてフッ素系不活性液体であるフロリナート（FC-3283）を採用した。液流は乱流域とし、コア表面からフロリナートへの熱伝達係数を  $750\text{W/m}^2/\text{K}$  とする。フロリナートは高価格<sup>[3]</sup>であるが、ファインメットコアの価格と性能を考慮すると合理的投資と言える。

## 3. 大電力試験

コアモジュール1式のみを装荷した試験構造を設計・製作し、10kWまでの連続波を給電した。コア表面の温度測定、熱伝達係数の測定、及び高負荷耐久試験を行った。電力8kWまでの電力試験については前回報告した<sup>[3]</sup>。

### 3.1 試験構造

試験構造の断面図を図3に示す。 $\lambda/4$ 同軸共振器の半セル構造となっている。共振周波数は1.7MHz

である。コアモジュールを1式のみ装荷し、加速ギャップの代替として真空可変キャパシタを用いている。LCRメータによる試験構造のシャントインピーダンスの測定値は1.7MHzにおいて $146\Omega$ である<sup>[4]</sup>。

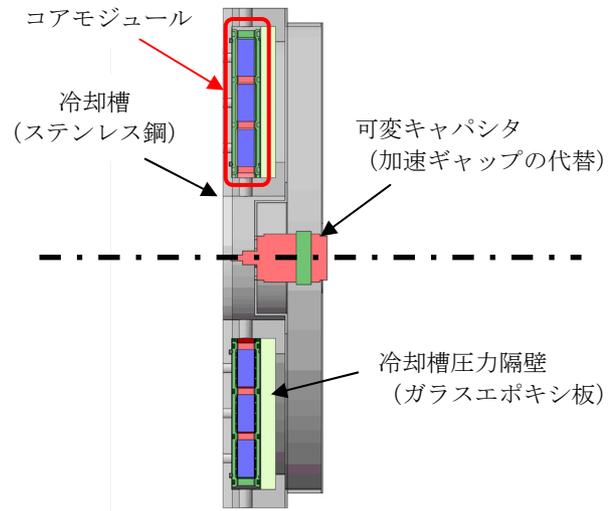


図3：試験構造の断面図（半セル構造）<sup>[3]</sup>

### 3.2 高周波電源

半導体増幅高周波電源を用いる。出力パワー（連続波）：0~10kW、出力周波数：800kHz~3MHz、出力インピーダンス： $50\Omega$ である。大電力試験では出力周波数は1.7MHz固定で使用した。

### 3.3 冷却系

ポンプはマグネット式のものを使用した。最大流量は150L/minである。熱交換器の2次冷却系には約30°Cの純水を流した。将来的には、放射線によりフロリナートが分解してできる酸、水分、及び有機物などを除去するフィルターを備えた独立な循環系を設ける必要がある<sup>[3]</sup>。

### 3.4 コア表面の温度測定

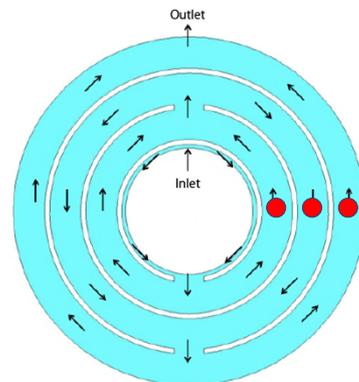


図4：感温塗料の塗布位置。赤丸が塗布した位置である<sup>[4]</sup>。

感温塗料を用いて、給電中のコア表面温度を直接測定した。図4に示す流路の赤丸の位置に感温塗料を塗布し、試験構造ショート板に取り付けたビューポートから変色を目視にて観察した。予めホットプレートで感温塗料の温度特性を校正し、変色の開始及び終了温度を調べた。図5の緑の帯が校正の結果である。

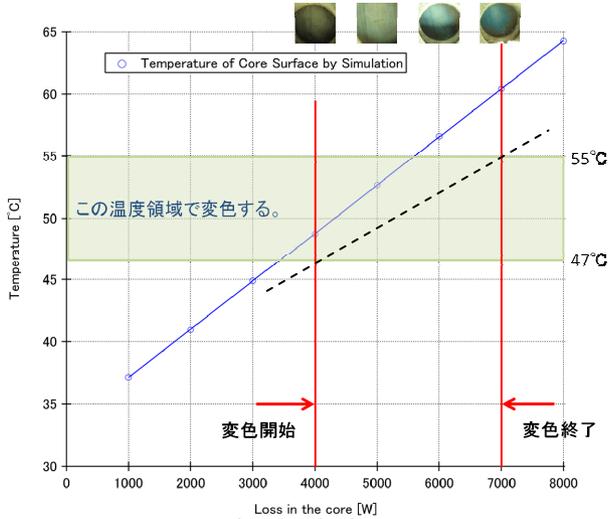


図5：コア表面温度の測定結果とシミュレーション値<sup>[4]</sup>。

電力試験では、熱負荷の最も厳しい小コア<sup>[4][5]</sup>に塗布した感温塗料のみが変色した。コアモジュールでの電力損失が 4kW のときに変色が始まり、7kW で終わった。

一方、ANSYS CFX 上に電力試験に用いた試験構造と同様なモデルを作成し、小コア表面温度の計算を行った。その結果が図5の青線である。よって、2本の赤線と緑の帯で囲まれた長方形の対角線(図5)の近傍を青線が通れば、シミュレーションと実験が一致したことになる。青線がやや上方にあるが、感温塗料の誤差±10°Cを考えると一致していると言える。

### 3.5 熱伝達係数測定

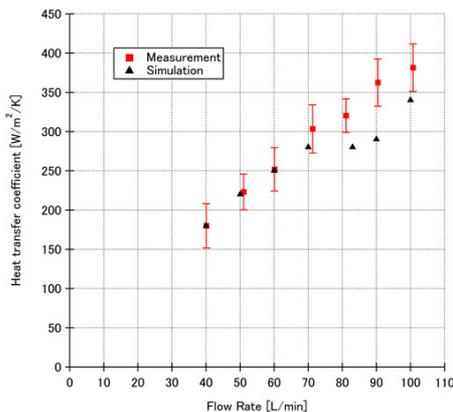


図6：時定数測定から得られる熱伝達係数。赤四角は測定値、黒三角はシミュレーション値である<sup>[4]</sup>。両者が20%以内で一致した。

実験方法は以下の通りである。試験構造に一定の電力で給電し、熱的定常状態にする。瞬間的に給電を停止する。以降の冷却過程における液温変化の時定数 $\tau$  [s]から(1)式を用いて熱伝達係数 $h$  [W/m<sup>2</sup>/K]が得られる。

$$h = \frac{\rho CV}{\tau A} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]はコアの密度、 $C$  [J/kg/K]はコアの比熱、 $V$  [m<sup>3</sup>]はコアの体積、 $A$  [m<sup>2</sup>]はコアの表面積である。

一方、過渡的シミュレーションを用いて同様に時定数を計算した。結果を図6に示す。実験とシミュレーションの結果は20%以内で一致した。このことからシミュレーションの信頼性を確認できた。

フロリナート液流(乱流)による冷却効率を直接表す量はコア表面からフロリナートへの熱伝達係数であり、この値をANSYS CFXにより求めた。結果を図7に示す。大電力試験では100L/minまで試験した。流量83L/minにおいて、設計値である750W/m<sup>2</sup>/Kが得られていることがわかる。

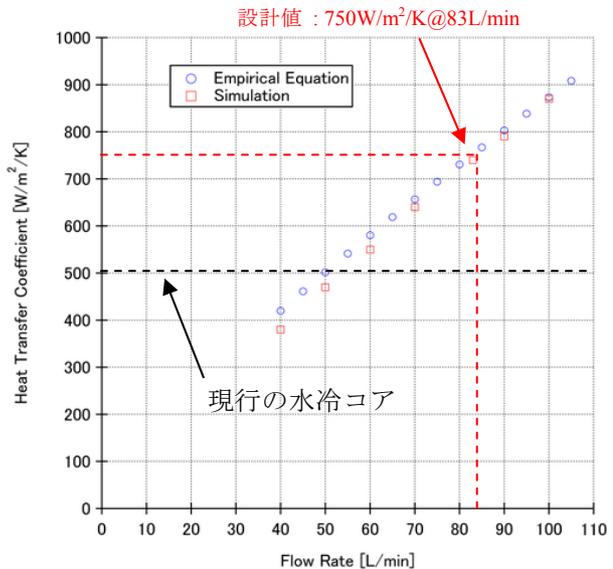


図7：コア表面からフロリナートへの熱伝達係数。青丸は経験式による値、赤四角はシミュレーションによる値<sup>[4]</sup>。

### 3.6 高熱負荷試験

試験構造に10kW給電し、8時間連続運転した。耐久試験後、シャントインピーダンスの劣化はみられなかった。耐久試験後、冷却槽から取り出したコアモジュールを分解し、コア表面及びガラスエポキシ板を目視にて観察したが異常は認められなかった。また、運転に使用したフロリナートのサンプルをメーカーに返送し、分析した結果、絶縁耐力、フッ素イオン濃度、水分溶解量に異常は認められなかった。

## 4. 耐電圧試験

運転中のマルチリングコアには径方向に電圧がかかる。金属磁性薄帯の間の絶縁層（6 $\mu\text{m}$ ）での放電が懸念される。我々はフロリナートに浸漬した小コアの内径、外径間に高電圧パルスを印加して耐電圧性を調べた。

### 4.1 ファインメット層にかかる電圧

小・中・大コアはファインメット磁性薄帯を巻き上げた積層構造（約 3400 層）である。図 8 に示すモデルを用いて、HFSS によりコア表面での電場分布をシミュレーションした。結果を図 9 に示す。

加速ギャップ側の小コアに最も電圧がかかり、その値は 2.4kV である。一層あたりの電圧は 0.7V となる。我々は耐電圧性を調べるために小コアに 10kV の高電圧パルス（一層あたり 3V）を印加して耐電圧試験を行った。絶縁油中においては放電が起こる電圧は一層あたり 5V 前後と報告されている<sup>[6]</sup>。フロリナートは絶縁油と同等の絶縁耐力をもつ<sup>[5]</sup>ことから、当該試験では放電は起こらないと予想される。

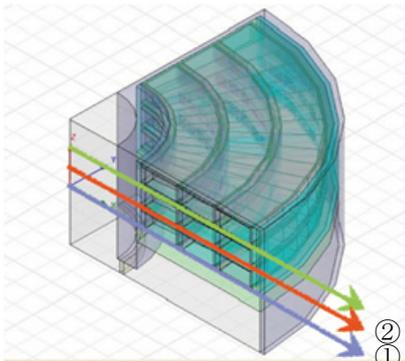


図 8：電場分布計算のモデル<sup>[4][5]</sup>。対称条件から、1 ギャップ構造全体の 1/8 のモデルとなっている。3つのライン上の電場分布を求める。

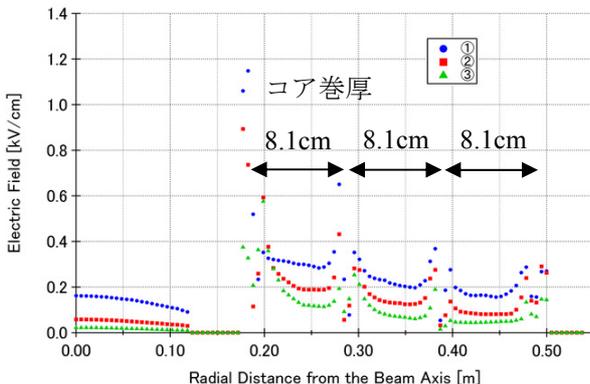


図 9：コア表面での電場分布<sup>[4][5]</sup>。3色のプロットはそれぞれ図 8 のラインに対応する。

### 4.2 等価回路

小コアの等価回路を図 10 に示す。ファインメッ

ト薄帯の直流抵抗（薄帯に沿って）と層間キャパシタの並列回路である。小コアの内径、外径間に印加するパルス波形を図 11 に示す。繰返しは 10kHz である。この等価回路を用いて回路シミュレータ（TINA）により電圧・電流波形をシミュレーションした結果を図 12 に示す。

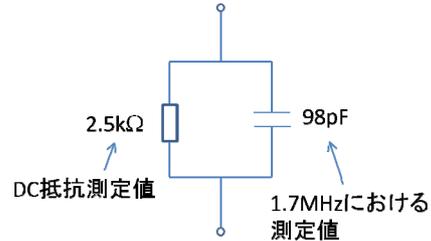


図 10：小コアの等価回路。ファインメット薄帯の DC 抵抗と層間キャパシタの並列接続である。

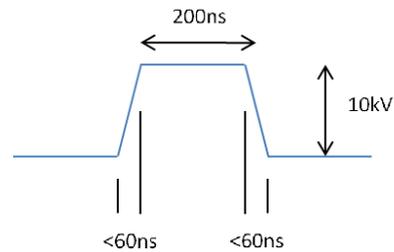


図 11：印加電圧パルス波形

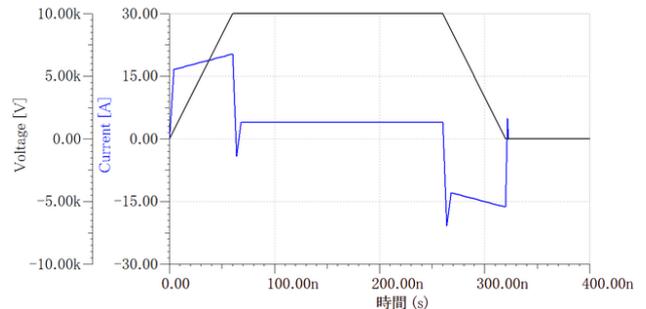


図 12：図 10 の等価回路を用いた電圧・電流波形のシミュレーション。

### 4.3 耐電圧試験

耐電圧試験の様子を図 13 に示す。フロリナートを満たした円筒容器に小コアを浸す。コア表面を両面から観察できるように容器の端板はアクリル板である。電気関係測定系のブロック図を図 14 に示す。試験中に観察された波形の典型例を図 15 に示す。印加高電圧パルスの立上り下がりシミュレーションと異なり直線的ではなく、歪みがあるので、電流波形がシミュレーションのように台形的ではない。高電圧パルス印加中、コア表面を目視により観察したが、放電等の異常は認められなかった。同様に電流波形にも異常は認められなかった。

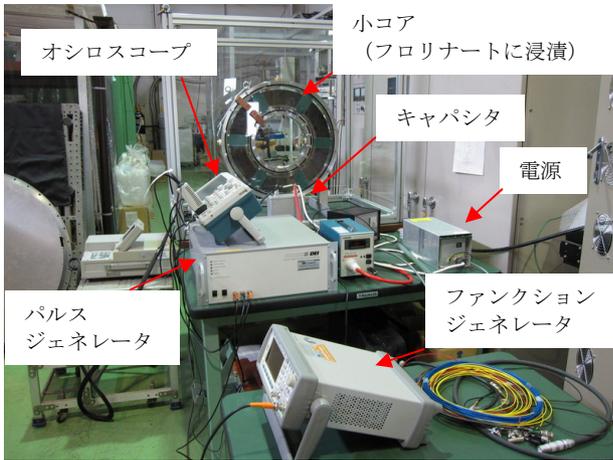


図 1 3 : 耐電圧試験の様子

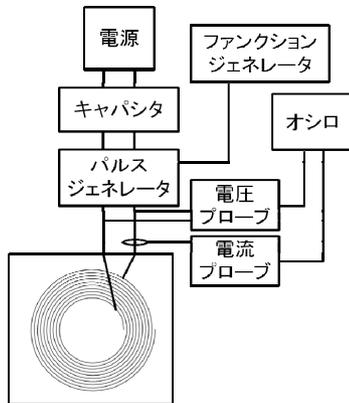


図 1 4 : 電気関係測定系のブロック図

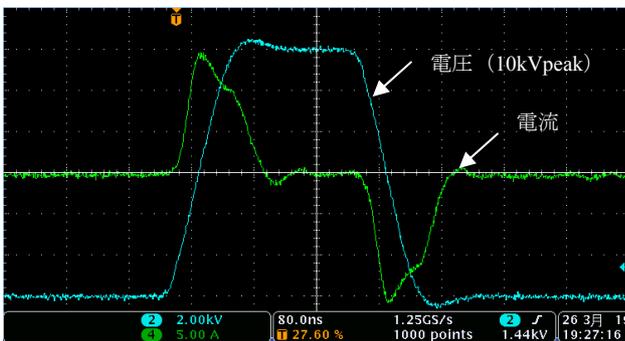


図 1 5 : 10kV パルス電圧印加時の電圧・電流波形

## 5. まとめ及び今後の予定

不活性冷媒液冷式のマルチリングコア 1 式を装荷した試験構造の大電力試験を行った（熱負荷試験）。併せて、小コア単体に対する耐電圧試験を行った。

- コア表面温度を測定し、感温塗料の誤差の範囲内でシミュレーションと一致することを確認した。
- 試験構造への給電停止後の液温変化の時定数を測定して熱伝達係数を算出し、シミュレーショ

ンと 20%以内で一致していることを確認した。これによりシミュレーションの信頼性を確認した。

- コア表面からフロリナートへの熱伝達係数をシミュレーションから求め、設計値が得られていることを確認した。
- 小コア単体に対する耐電圧試験を行った。定格の約 4 倍の高電圧パルスの小コアに印加した。コア表面を目視で観察したが異常は認められず、オシロスコープ上の電流波形にも異常は認められなかった。

以上の結果により、マルチリングコア構造が RCS の要求を満たすことを確認できた。

今後は、

- コアモジュール 3 段積みの中核加速構造を製作し、次段階の大電力試験を行う。
- 外径 115mm、巻厚 39mm の小径コアに高電圧パルスを印加して、放電発生時の電圧閾値を調べる。放電発生時の状況（目視、電圧・電流波形）を調べたい。
- インターロック系、モニター系を整備し、コアモジュール 1 式装荷の試験構造に対する長時間の高熱負荷試験を続ける。
- 30GeV シンクロトロン（MR）用マルチリング加速構造の開発を検討する。

## 参考文献

- [1] F. Tamura, “高エネルギー加速器セミナーOHO（2010年）”
- [2] M. Nomura, et al., “Condition of MA Cores in the RF Cavities of J-PARC Synchrotrons after Several Years of Operation”, IPAC '10
- [3] Y. Morita, et al., “DEVELOPMENT OF AN RF ACCELERATING STRUCTURE LOADED WITH FINEMET MAGNETIC CORES COOLED BY A CHEMICALLY INERT LIQUID”, 第 7 回日本加速器学会年会
- [4] Y. Morita, “博士論文 Development of a New RF Accelerating Cavity Loaded with Magnetic Alloy Cores Cooled by a Chemically Inert Liquid for Stabilizing and Enhancing the Performance of J-PARC Ring Accelerator”, <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/yamashita/?page=theses>
- [5] T. Takahashi, “修士論文 J-PARC における磁性体コアを用いた加速空洞の大強度安定化のための研究”, <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~takahashi/master-takahashi.pdf>
- [6] 日立金属株式会社との私信