

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

高橋 武士
東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
東京大学素粒子物理国際研究センター山下了研究室
takahasi@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

平成22年1月

概要

平成 21 年 7 月に第 1 期建設が完了した大強度陽子加速器施設 J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) は世界最高クラスの大強度陽子ビームを生成する加速器とその大強度陽子ビームを利用する実験施設で構成される最先端科学の研究施設である。実験施設では一次粒子として陽子、二次粒子として中性子やミュオン等が使い、原子核素粒子実験、物質・生命科学実験、核変換実験等が行われている。加速器の構成は線形加速器、Rapid-Cycling Synchrotron (RCS) と呼ばれる 3GeV シンクロトロン、その後段の最大 50GeV シンクロトロン (MR) からなり、RCS と MR の高周波空洞には磁性体コアに日立金属株式会社が開発したファインメットという金属磁性体が使われている。磁性体コアはファインメット箔帯をコイル状に巻き、低粘度エポキシ樹脂による含浸を行いコアを固め、表面に防錆の為に高粘度エポキシ樹脂でコーティングをして作られている。RCS は平成 19 年 5 月に 10 台、平成 20 年 11 月に 11 台目の高周波空洞が設置されて運転が行われているが、平成 21 年 1 月に行われたインピーダンス測定で急激なインピーダンスの低下を起こしている高周波空洞が確認された。インピーダンスの低下を起こした空洞を解体したところ、磁性体コアの内径側に座屈を起こし、箔帯が破断しているものやコア表面の防錆コーティングが剥がれて錆びているものが確認され、これらがインピーダンスの低下の原因であることが確認された。本論文の一つ目の主題として座屈の原因究明にあたり、汎用 FEM 連成解析ソフト ANSYS を用いて磁性体コアの熱応力シミュレーションを行い、コア内部の圧縮応力の解析を行った。シミュレーションでは含浸したコアをマクロ的に見た物性値を使ったマクロ媒質モデルとマイクロ構造をそのまま入れたマイクロモデルの二種類で行った。また、熱応力を軽減するために冷却効率を向上したモデルや樹脂のヤング率を小さくしたモデルなども試した。このシミュレーションと平行して磁性体コアを切り出して作ったサンプルの圧縮試験を行った。その結果、磁性体コアの占積率や部分に影響せず約 20MPa~60MPa で座屈を起こす結果が得られた。この結果は RCS コアを模したシミュレーションの圧縮応力よりも小さく、座屈の原因は座屈応力以上の熱応力が磁性体コア内部に生じているためであることが理解できる。熱応力の観点から実用に耐えられそうなものは低粘度エポキシ樹脂含浸を行わないコアを想定したモデルのみであった。このモデルより、座屈を防ぐためには含浸を行わない方が良いことが結果から理解できる。この結果を踏まえて、低粘度樹脂含浸を行わない磁性体コアを装荷した新しい加速構造の設計、開発を東京大学山下研究室と KEK 影山達也教授、東京大学宇宙線研究所 亀田純氏が共同で行っている。この構造では 1 枚のコアを径方向に 3 分割し、これを 1 式としてコア表面に流路を作り、そこに冷媒を流してコアを冷却する。冷媒にはファインメットに対して腐食性を持たない液体であるフロリナートを使用する。フロリナートを使用することで防錆コーティングが不要になり、磁性体コアを直接冷却することが可能になる。さらに、流路内部に乱流を生じさせることで冷却効率の向上を図る。本論文の二つ目の主題としてこの構造が RCS で使用する事を想定した加速勾配で実用可能か電磁場解析ソフト HFSS を使い、電磁場解析を行った。その結果、冷媒や流路を構成する FRP 等の絶縁破壊強度と比べて十分弱い電場しか存在せず、構造が実用に耐えるものであることがわかった。また、熱流体解析ソフト ANSYS CFX を使い、効率よくコアを冷却する構造について模索し、ほぼ全域で乱流となる流速 0.4m/s 以上を達成した。

目次

概要	i
第1章 序論	1
第2章 J-PARC の概要	3
2.1 J-PARC の実験施設	3
2.1.1 原子核素粒子実験施設	3
2.1.2 物質・生命科学実験施設	5
2.2 J-PARC の加速器	5
2.2.1 Linac(線形加速器)	6
2.2.2 Rapid-Cycling Synchrotron(RCS)	7
2.2.3 Main Ring(MR)	10
第3章 RCS コアのシャントインピーダンス低下の原因究明	13
3.1 磁性体コアの製作過程	13
3.2 シャントインピーダンスが低下した RCS コアについて	14
3.3 磁性体コア内部の熱応力シミュレーション	17
3.3.1 マクロ媒質モデルの概要	17
3.3.2 マクロ媒質モデルの RCS コアの熱応力シミュレーション	20
3.3.3 マクロ的手法を用いたコア内部の熱応力緩和に向けての改善案	21
3.3.4 ミクロ構造を取り入れたモデル	26
3.3.5 接触解析	34
3.4 ファインメットコアの圧縮試験	37
第4章 フロリナート液冷却式金属磁性体コア装荷加速構造	43
4.1 フロリナート液冷却式金属磁性体コア装荷加速構造の概要	43
4.2 3D 電磁場シミュレーション	47
4.2.1 シミュレーション手法の概要	47
4.2.2 磁性体コア内部の磁束密度	49
4.2.3 磁性体コア表面の電場	50
4.3 3D 流体シミュレーション	52
4.3.1 3D 流体シミュレーション概要	52
4.3.2 改善した流路を使った 3D 流体シミュレーション	57

第5章	まとめと課題	66
5.1	RCS コアのシャントインピーダンスの低下の原因	66
5.2	フロリナート式金属磁性体コア装荷加速構造	66
5.2.1	電磁場シミュレーションまとめ	66
5.2.2	流体シミュレーションまとめ	67
5.2.3	将来計画	67
付録A	加速空洞の一般論	69
付録B	熱伝達係数の計算式	72
付録C	シャントインピーダンスの計算	74
付録D	共振周波数の計算	76
	参考文献	78

目次

2.1	J-PARC 全体図 ^[6]	3
2.2	Linac 配置図	6
2.3	RCS 配置図	8
2.4	RCS 空洞	8
2.5	RCS タンク二個と加速ギャップの内部構造 (断面)	8
2.6	RCS の磁性体コア	9
2.7	MR の構成図	11
2.8	カットされた MR 用磁性体コア	11
3.1	ファインメットの結晶化の模式図	13
3.2	座屈したコア	14
3.3	シャントインピーダンスの低下 ^[17]	15
3.4	各コアの構造 ^[17]	16
3.5	マクロ媒質モデルのコア	17
3.6	ファインメットとエポキシの層構造	18
3.7	ファインメットとエポキシの層の平行なずれ	18
3.8	コアの発熱分布	20
3.9	RCS コアの熱応力シミュレーション	21
3.10	流速 0.1m/s コアの最高温度	22
3.11	流速 0.1m/s コーティングなしの場合の熱応力の周方向成分の最大値	22
3.12	流速 0.3m/s コアの最高温度	23
3.13	流速 0.3m/s コーティングなしの場合の熱応力の周方向成分の最大値	23
3.14	流速 0.4m/s コアの最高温度	24
3.15	流速 0.4m/s コーティングなしの場合の熱応力の周方向成分の最大値	24
3.16	流速 0.5m/s コアの最高温度	25
3.17	流速 0.5m/s コーティングなしの場合の熱応力の周方向成分の最大値	25
3.18	ミクロ構造を取り入れたモデルの概略図	26
3.19	2000 層モデルの温度分布	27
3.20	エポキシ層のヤング率 100%のときのコア内応力の周方向成分	28
3.21	エポキシ層のヤング率 100%のときのファインメットにかかる応力の周方向成分	28
3.22	エポキシ層のヤング率 100%のときのエポキシ層にかかる応力の周方向成分	29
3.23	エポキシ層のヤング率 100%のときの FRP にかかる応力の周方向成分	29
3.24	エポキシ層のヤング率 10%のときのコア内応力の周方向成分	30

3.25	エポキシ層のヤング率 10%のときのファインメットにかかる応力の周方向成分	30
3.26	エポキシ層のヤング率 10%のときのエポキシ層にかかる応力の周方向成分	31
3.27	エポキシ層のヤング率 10%のときの FRP にかかる応力の周方向成分	31
3.28	エポキシ層のヤング率 1%のときのコア内応力の周方向成分	32
3.29	エポキシ層のヤング率 1%のときのファインメットにかかる応力の周方向成分	32
3.30	エポキシ層のヤング率 1%のときのエポキシ層にかかる応力の周方向成分	33
3.31	エポキシ層のヤング率 1%のときの FRP にかかる応力の周方向成分	33
3.32	接触解析の結果	34
3.33	図 3.32 の拡大	35
3.34	接触部での応力の周方向成分	36
3.35	接触部付近での FINEMET 箔帯の変位量	36
3.36	磁性体コアのサンプル	37
3.37	サンプルの切り出し	38
3.38	圧縮試験のサンプル	38
3.39	圧縮試験装置一式 (物質材料研究機構材料創製・信頼性グループ)	39
3.40	サンプルの圧縮方向	39
3.41	座屈を起こしたサンプル	40
3.42	サンプルの変位と荷重	40
3.43	圧縮試験の結果	41
3.44	圧縮破壊を起こしたサンプル	42
4.1	加速空洞の概略図	44
4.2	分割コアの形状	45
4.3	コア一式と FRP 板を組み合わせた断面図	45
4.4	冷却システムの概略図	46
4.5	局所直交座標系の設定の概念図	47
4.6	磁束密度分布のベクトル図	48
4.7	規格化した加速勾配	49
4.8	規格化した磁束密度	49
4.9	図 4.10 に示す電場の経路	50
4.10	規格化したコア表面の電場	50
4.11	流路の形状	52
4.12	CFX で使ったコアのモデル	53
4.13	流路とコア一式の形状	53
4.14	コア一式の発熱分布	54
4.15	流路の流体シミュレーション	55
4.16	温度を表示する面	55
4.17	コア一式の温度分布	56
4.18	小コアの上流部の拡大図	57
4.19	すのこの形状	57
4.20	改善策を施した流路の流速	58

4.21	改善策を施したコア一式の温度分布	59
4.22	フロリナートの温度分布	60
4.23	40°Cのフロリナートを用いた冷却時のコア一式の温度分布	61
4.24	40°Cのフロリナートの温度分布	62
4.25	50°Cのフロリナートを用いた冷却時のコア一式の温度分布	63
4.26	50°Cのフロリナートの温度分布	64
4.27	各コアの澱み部分	65
5.1	試作機の加速構造	68
A.1	計算に用いた共振回路	69
B.1	流路の断面	72
D.1	積分経路	76

表目次

2.1	Linac のパラメーター ^[6]	7
2.2	RCS のパラメーター ^[6]	10
2.3	MR のパラメーター ^[6]	12
3.1	コアのタイプと発生した問題 ^[17]	16
3.2	マクロ媒質モデルの物性値 1	19
3.3	マクロ媒質モデルの物性値 2	19
3.4	水の流速と熱伝達係数	21
3.5	ミクロ構造モデルの物性値	27
4.1	比較検討した冷媒の代表的な物性値	43
4.2	加速構造の構成要素	44
4.3	各コアの寸法	45
4.4	マクロ媒質的に近似した磁性体コアの異方性 ^[3]	47
4.5	構成要素の比誘電率と比透磁率	48
4.6	コア表面の電場 (ピーク値) と絶縁破壊電圧	51
4.7	ファインメットとフロリナートの物性値	54
4.8	1 気圧での各温度のフロリナート (住友 3M FC-3283) の物性値と臨界流速	60
C.1	コアの寸法と比透磁率	74
C.2	各コアのシャントインピーダンス	75
D.1	各経路のインダクタンスとキャパシタンスとビーム方向の厚み	76

第1章 序論

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が共同で建設、運営を行っている大強度陽子加速器施設である。この施設は世界最高クラスの大強度陽子ビームを生成する加速器と、その大強度陽子ビームを利用する実験施設で構成された最先端科学の研究施設である。加速器の構成は線形加速器 (Linac)、3GeV の速い繰り返しのシンクロトロン (Rapid-Cycling Synchrotron, RCS)、最大 50GeV の主リング (Main Ring, MR) シンクロトロンからなる。従来の加速空洞ではフェライトコアがよく使用されてきたが、RCS 及び MR では日立金属株式会社が開発したファインメットという金属磁性体を利用したコアを装荷している。ファインメットの利点として飽和磁束密度が高い事とキュリー温度が高く (570℃)、単位体積あたりに多くのパワーを入力する事が可能になる。これらの利点から大強度陽子ビームを加速するシンクロトロンでは不可欠な高加速勾配が得られるため、ファインメットを採用した。磁性体コアの製作過程はファインメットの箔帯をコイル状に巻き、低粘度エポキシ樹脂による含浸を行いコアを固め、表面に防錆の為に高粘度エポキシ樹脂でコーティングをして作られている。RCS ではこの形のコアを、MR ではこれをカットしてギャップを作ることで Q 値を調整したコアを装荷している。

RCS は平成 19 年 5 月に 10 台、平成 20 年 11 月に 11 台目の高周波空洞が設置されて運転が行われているが、平成 21 年 1 月に行われたインピーダンス測定で急激なインピーダンスの低下を起こしている高周波空洞が確認された。インピーダンスの低下を起こした空洞を解体して調査した結果、磁性体コアの内径側に座屈を起こして箔帯が破断しているものやコア表面の防錆コーティングが剥がれて錆びているものが確認された。これらのコアのインピーダンスを測定した結果、以前と比べてインピーダンスの低下が確認され、これらのコアが原因であることが確認された。

座屈を起こしたコアは錆びたコアよりも数が多く、インピーダンスの低下が大きく、高周波加速空洞のインピーダンスの低下の主原因になっている。インピーダンスの低下の主原因である座屈の原理究明のため、磁性体コア内部に生じる熱応力のシミュレーションと磁性体コアの圧縮試験を行い、比較を行った。熱応力シミュレーションは RCS コアの発熱分布と冷却効率から RCS に使われている磁性体コア内部に発生している熱応力を見積もった。また、冷却効率やコアの構造や低粘度樹脂の物性値などを変化させ、何が内部応力に寄与するのか調査し、磁性体コアの改善方法を模索した。磁性体コアの圧縮試験は磁性体コアを切り出して作ったサンプルを圧縮し、座屈させることでコアがどの程度の応力で座屈が生じるか調査した。その結果、座屈応力以上の熱応力が RCS コアの内部に生じているというシミュレーション結果が得られた。また、改善方法を模索した結果、熱応力の観点からは低粘度エポキシ樹脂含浸を行わないコアが有利であることがわかった。このシミュレーション結果は、少数ではあるが、低粘度エポキシ樹脂含浸を行わなかったコアが座屈

を起こしていない事実と一致している。

これらの結果を踏まえて低粘度エポキシ樹脂含浸を行わないコアを装荷した加速構造として新しい構造の設計、開発を東京大学山下研究室と KEK 影山達也教授、東京大学宇宙線研究所亀田純氏が共同して行っている。この構造の特徴は RCS では 1 枚だったコアを径方向に三分割し、これを一式として扱うこと、コアの内径側についているカラーと FRP で作られた二枚の板を使い流路を形成すること、冷媒には鉄を主成分とするファインメットを腐食しない液体であるフロリナートを使うことなどが挙げられる。この加速構造が RCS で使用する事を想定した加速勾配で実用可能か調べるために電磁場シミュレーションを行った。また、熱流体解析ソフトを使うことで効率よくコアを冷却する構造について模索した。

本論文は前半に RCS で生じた座屈の原因究明について論じ、後半では原因究明の過程で判明したことを参考に座屈を起こさない新しい加速構造について論じる構成を取る。

第2章 J-PARCの概要

大強度陽子加速器施設 J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力開発研究機構 (JAEA) が共同で進めているプロジェクトである。この施設は平成13年度から建設が始まり、平成21年7月に行われた J-PARC 完成記念式典で第1期建設分の施設完成が報告された。J-PARC は世界最高クラスの大強度陽子ビームを生成する加速器と一次粒子である陽子と二次粒子である中性子やミュオン等が利用できる実験施設から構成されている。



図 2.1: J-PARC 全体図 [6]

この章では J-PARC の加速器と実験施設、計画されている実験について説明を行う。

2.1 J-PARC の実験施設

J-PARC の実験施設では加速器で生成された大強度陽子ビームを使い、実験が行われている。実験施設は原子核素粒子実験施設、物質・生命科学実験施設、核変換実験施設の三種類がある。各実験施設では一次粒子である陽子と二次粒子である中性子やミュオン等が用途に合わせて使われる。この節では素粒子実験との関係が深い原子核素粒子実験施設と物質・生命科学実験施設について紹介する。

2.1.1 原子核素粒子実験施設

この実験施設はハドロン実験施設とニュートリノ実験施設の2つの実験施設からなる。MR から取り出した大強度陽子ビームは各実験施設に送られ、そこで作り出される二次粒

子ビームや陽子ビームそのものを使い、原子核反応や素粒子崩壊などの様々な実験が可能である。二次粒子は K 中間子、 π 中間子、ハイペロン、ニュートリノ、ミューオン等が利用可能である。これらの粒子ビームを使って非常に精密な観測や未観測の現象の探索などが計画されている。次にこの施設で行われている素粒子実験と関係のある研究・計画の一部を紹介する [7]。

長基線ニュートリノ実験 T2K

J-PARC で生成した大強度ニュートリノビームを 295km 離れたスーパーカミオカンデで観測し、世界最高感度でニュートリノ振動を研究する実験が T2K(Tokai to Kamioka) 実験である。ニュートリノ振動現象はニュートリノ質量が 0 でない証拠であり、素粒子の標準模型を超える物理の存在を示している。ニュートリノ振動は複数の種類のニュートリノが混合した結果として起こり、ニュートリノ混合行列を使って記述できると考えられている。まだ発見されていない第 1 世代と第 3 世代のニュートリノの間での混合現象の発見が、ニュートリノ物理の重要テーマかつ、T2K 実験の第 1 目標でもある。 θ_{13} が 0 でないことが発見され、ニュートリノ混合行列が確立できれば、ニュートリノでの CP 対称性の破れが予想される。未知の CP 対称性の破れの発見は宇宙創成の過程でどのように CP 対称性が破れたのかを解明することに寄与すると期待される。また、ニュートリノ振動の研究を通してニュートリノ質量の起源を究明することは、素粒子物理学の力の統一理論へのアプローチとして、超高エネルギーの物理を探る一つの重要な手法である。

中性 K 中間子稀崩壊実験

1964 年に発見された CP 対称性の破れは近年の K 中間子と B 中間子の実験によって小林・益川が提唱した「クォーク間の混合に入る複素位相」で説明されることが明らかになった。しかし、この複素位相だけでは宇宙に物質がある事を説明できず、標準理論を超える新しい物理による別の CP 対称性の破れが存在すると考えられる。この新たな CP 対称性の破れは $K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu}$ 崩壊に寄与する可能性がある。これらの崩壊の分岐比が、B 中間子崩壊から標準理論を使って予測される分岐比と食い違えば、これは新しい物理の発見につながる。CERN では $K^+ \rightarrow \pi^+\nu\bar{\nu}$ 崩壊の実験が準備されており、J-PARC では中性の K 中間子の崩壊 $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$ の実験を行う。

また、これらの実験と平行して、 $K^+ \rightarrow \pi^0\mu^+\nu$ 崩壊を用いて時間の対称性の破れを現在よりも一桁よい感度で探る実験が現在計画されている。

ストレンジネス核物理

ストレンジネス核物理を代表するハイパー核の研究は、KEK 陽子シンクロトロンや米国 BNL AGS 加速器において、日本人研究者が中心となって進めた様々な実験によって大きく発展した。J-PARC ハドロンホールでは、KEK の数百倍の強度の K 中間子や π 中間子ビームが得られるので、反応確率の小さな現象も調べることができるようになり、ストレンジネス核物理の飛躍的な進歩が期待される。

ハドロン核物理

陽子・中性子をはじめとするハドロンは、我々の物質世界を形作る基本要素でありながら、その基本的属性である質量・スピンの発現機構や構造が、いまだに理解されていない。J-PARC では大強度ハドロンビームを用いてカイラル対称性の部分的回復のしくみや核子スピンの起源などの解明を目指す。

2.1.2 物質・生命科学実験施設

物質・生命科学実験施設 (MLF) では、RCS から取り出したパルス陽子ビームより世界最高強度のミュオン及び中性子ビームを生成し、これらを用いて物質科学、生命科学研究を推進させることを目的としている。2009A 期の中性子ビーム及びミュオンビームの供給運転は5月27日から6月22日の間行われ、7台の中性子実験装置と1台のミュオン実験装置で実験課題が実施された。現在、5台の中性子実験装置と1台のミュオン実験装置が、ユーザー利用に向けてコミッショニング中である。ミュオン実験装置は物性物理学、化学、素粒子物理学、非破壊検査磁性材料評価等の分野で応用が可能である。中性子実験装置はナノテクノロジー・材料分野、エネルギー・環境分野、物理等の幅広い研究を展開している。次にこの施設で行われている素粒子実験と関係のある研究・計画の一部を紹介する。

COMET 実験^[18]

COMET 実験は大強度ミュオンビームを固定標的に入射させ、そこで起こる $\mu^- - e^-$ 転換過程を探索する実験である。 μ^- が物質中で停止すると原子核に捕獲されてミュオン原子を形成し、最終的に崩壊を起こすかミュオン原子核捕獲反応が起こる。通常、ミュオン原子核捕獲反応は $\mu^- + (A, Z) \rightarrow \nu_\mu + (A, Z - 1)$ という反応を起こすが、超対称性理論からニュートリノのかわりに電子を放出する $\mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z - 1)$ という反応も起こることが予言されている。このニュートリノのかわりに電子を放出する現象を $\mu^- - e^-$ 転換と呼ばれる cLFV 過程の一つである。 $\mu^- - e^-$ 転換では単一エネルギーの電子が放出されるため、電子の運動量測定器には高い分解能が求められる。この現象を探索することで超対称性の寄与を実験的に検証できる可能性がある。

2.2 J-PARC の加速器

J-PARC の加速器は線形加速器 (Linac)、3GeV の速い繰り返しのシンクロトロン (Rapid-Cycling Synchrotron, RCS)、最大 50GeV の主リング (Main Ring, MR) シンクロトロンから構成される。第1期のデザインでは Linac はピーク電流 50mA、パルス幅 500 μ sec の負水素イオンを 400MeV まで加速し、25Hz の繰り返しで RCS に入射を行う。RCS へ入射するときに従来一般的に使われている断熱捕獲法ではビームロスが避けられないため、あらかじめリニアックでビームの 46% 間引き (chopping) しておく方式が採用されている。

RCS では Linac より入射したビームを 3GeV まで加速し、ビーム出力は 1MW になる。

このビームの大部分は物質・生命科学実験施設に送られ、約 10%がミューオンの生成、約 90%が中性子生成に使われ、実験が行われている。

RCS から取り出されたビームの一部が 0.3Hz で MR に入射され、そこで加速されたビームは原子核素粒子実験施設に送られる。ハドロン実験施設では遅い取り出し法でビームが供給され、そこではハイパー核実験や K 中間子稀崩壊実験などが計画されている。ニュートリノ実験施設では速い取り出し法でビームが供給され、ニュートリノビームを生成し、T2K 実験を行っている。第 1 期では MR の取り出しビームエネルギーの定格は 30GeV とする。

この節では各加速器の詳細について述べる。

2.2.1 Linac(線形加速器)

Linac は高周波 4 重極型リニアック (Radio-Frequency Quadrupole,RFQ)、アルバレ型ドリフトチューブ線形加速器 (Drift-Tube Linac, DTL)、分離型ドリフトチューブ線形加速器 (Separate-type DTL, SDTL) の三つのタイプの加速構造と負水素イオン源から構成されている。これらの配置は図 2.2 に表す。RFQ は長さおよそ 3m の空洞 1 台、DTL は長さおよそ 9m の空洞 3 台からなる。また、SDTL は長さおよそ 1.4m から 2.6m の空洞 30 台からなる。各空洞の運転周波数は 324MHz であり、高周波電力は最大出力 3MW のクライストロン 19 本によって供給される。

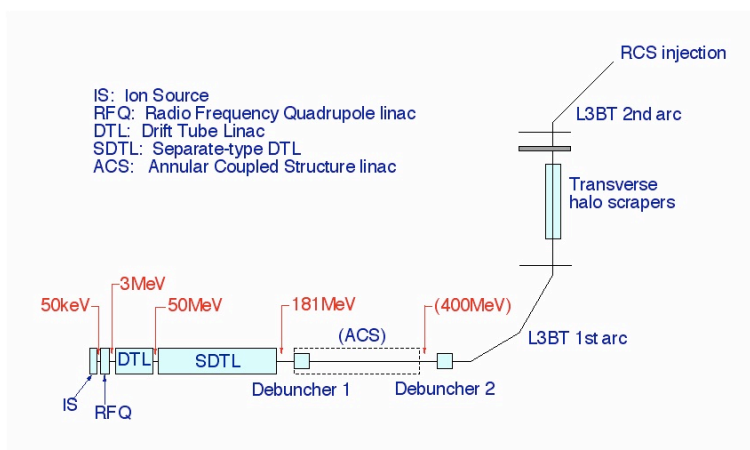


図 2.2: Linac 配置図 [9]

Linac でのビームの加速はまず始めに負水素イオン源で発生した負水素イオンを RFQ で収束しつつ 3MeV まで加速を行い、DTL に入射する。次に DTL では 3MeV で入射したビームを 50MeV まで加速を行い、SDTL に入射し、そこで 181MeV まで加速される。元々の Linac のビームエネルギーは 400MeV でデザインされていたが、Linac の予算を RCS の性能向上等に当てたため、当初は 181MeV で運転することとなった。Linac の低下した分のビームエネルギーは第二期に移行する前に環結合型結合空洞リニアック (Annular-Coupled Structure linac, ACS) を追加し、400MeV に向上させることが計画されている。

Linac で複数の加速構造を組み合わせてビームを加速している理由は負水素イオンの質量が電子と比べて非常に大きく、すぐに光速近くまで加速されないため、ビームの β の変化に対して電力効率の良い加速構造を使用するためである。そのため、異なる3つの加速構造を使用している。また、各加速構造の加速ギャップは β の変化に合わせて加速ギャップの間隔を調整してあり、設計通りにビームを加速するために高周波電場の位相と振幅には高精度の調整が要求される。

Linac の基本的なパラメーターを表 2.1 に表す。

Parameter	Value	comment
Ion species	H ⁻	
Output energy	400MeV	
Injection energy to ring (3 GeV RCS)	400MeV	
Peak current at injection	50mA	
Macropulse duration	500 μ sec	
Repetition	50Hz	
Ring injection cycle	25Hz	
Ring injection pulse length	455nsec	
Ring injection kicker gap	358nsec	
Ring filling fraction	56%	
Beam duty factor after chopping	1.4%	with 50Hz
Average beam current after chopping	700 μ A	with 50Hz
Transverse emittance at ring injection	<4 π mm \cdot mrad	
Momentum spread at ring injection	< \pm 0.1%	
Total length	248m	
Beam floor distance	1.5m/1.2m(for ACS and L3BT)	

表 2.1: Linac のパラメーター [6]

2.2.2 Rapid-Cycling Synchrotron(RCS)

RCS は高周波加速空洞、偏向・四重極電磁石、荷電変換装置、入射用電磁石、射出用電磁石等から構成されている (図 2.3)。

荷電変換装置では Linac から入射した負水素イオンは荷電変換フォイルを用いて H⁺ に変換を行い、陽子ビームを生成する。

高周波加速空洞はリングの直線部に 11 台+予備 1 台の加速空洞を配置している。加速空洞 1 台は六個のタンクと三つの加速ギャップからなり、タンク一つにつき三枚の磁性体コアが装荷されている。図 2.4 には一台の加速空洞を示し、図 2.5 に二個のタンクと加速ギャップで作られる内部構造を示す。これらを使い、合計で最大 450kV の加速電圧を発生させる。加速電圧及び加速周波数は入射時から出射時まで一定のパターンで変化させる必要が

あり、181MeVの入射ビームエネルギーでは0.938~1.67MHzの周波数が使われる。このように加速電圧および加速周波数を変化させるためには、Q値の低い加速空洞が必要となる。

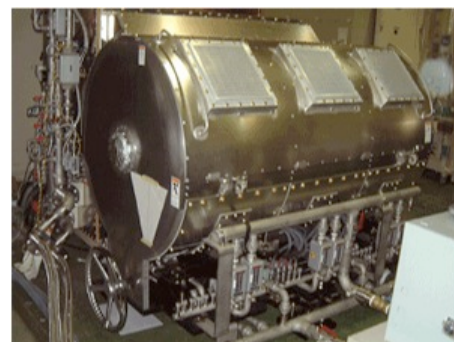
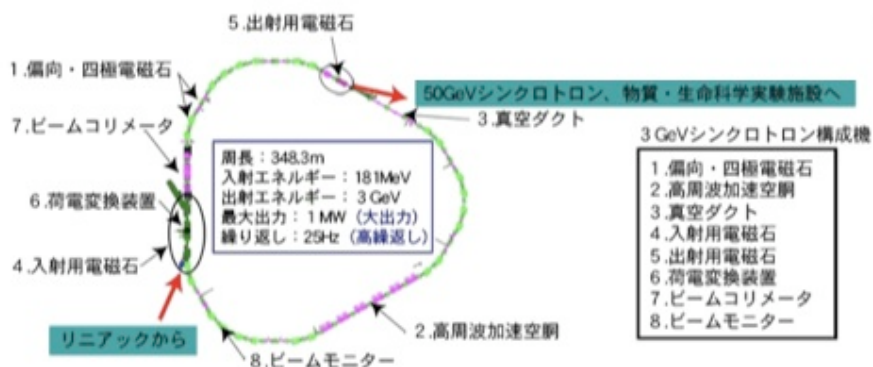


図 2.3: RCS 配置図 [6]

図 2.4: RCS 空洞 [6]

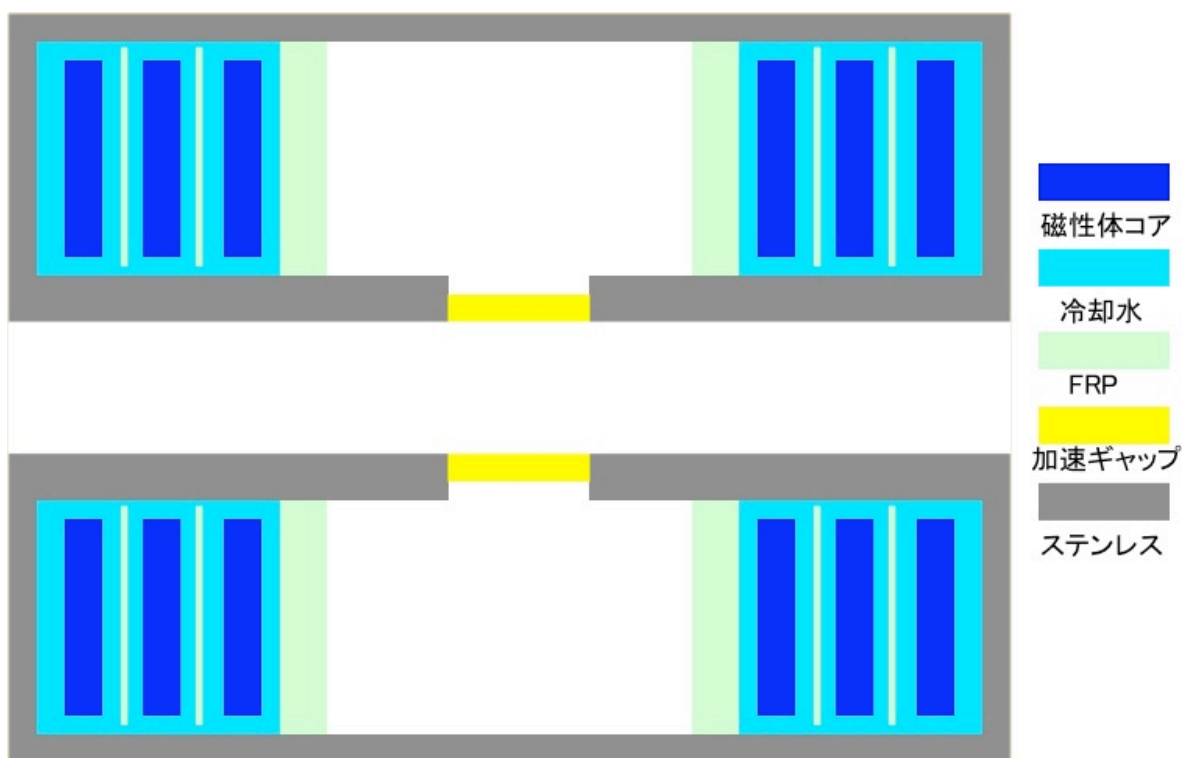


図 2.5: RCS タンク二個と加速ギャップの内部構造 (断面)

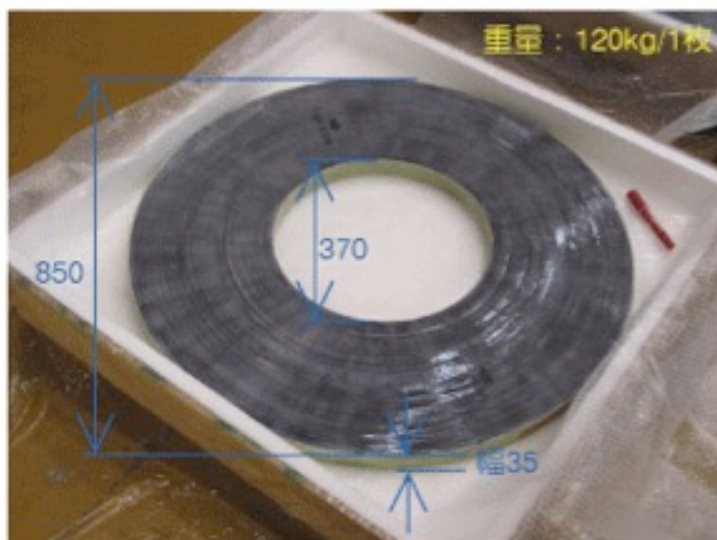


図 2.6: RCS の磁性体コア [6]

そのため、J-PARC のシンクロトロンでは日立金属株式会社が開発したファインメットという金属磁性体の箔帯をコイル状に巻いた磁性体コア (図 2.6) を採用している。ファインメットはフェライトを上回る透磁率、飽和磁束密度、キュリー温度 (570°C) をもつので単位体積あたりに従来よりも大きな高周波電力を入力できるため、高電圧を発生させることが可能となる。ただし、単位体積当たりの消費電力が大きいため、コアを取めた容器に冷却水を流して直接冷却を行っている。このコアは極めて低い Q 値 (~ 2) のために周波数同調系の必要がなく、高周波制御系が著しく簡素化できる。しかし、 Q 値が極めて低いにも関わらず、シャントインピーダンス R が実用になるほど高いということは、 R/Q が極めて高いことを意味し、空洞での蓄積エネルギーが極めて低いこととなる。その上、 Q 値が低いのであるから、極めて広帯域のビーム負荷補償系が必要となる。これは言わば、空洞がほとんど純粋抵抗に近く、ビームの作る逆電場をそのままの形で相殺する必要があるということである。その結果、非常に広帯域の大電力高周波源を開発する必要がある。

電磁石は様々な種類のものを用いることでビームを入射、周回、出射している。使用する電磁石は主電磁石として、24 台の偏向電磁石 (bending magnet, BM)、60 台の四極電磁石 (quadrupole magnet, QM) がある。BM はビームを偏向させ、リング状の閉軌道を周回させるために使われ、QM はビームを収束、発散させ、閉軌道の周りに安定に振動 (ベータトロン振動) させるために使われている。ちなみに、一周当たりのベータトロン振動数をチューンと呼ぶ。これに加えて、色収差 (クロマチシティ) 補正のための 18 台の六極電磁石が、軌道補正のために 54 台のステアリング電磁石が用いられる。前者は、ビームのエネルギーの広がりによって、QM の収束、発散力がわずかに異なり、チューンが異なることとなるので、エネルギーによらず一定のチューンにするためのものである。BM、QM、六極電磁石は、渦電流およびヒステリシス損を抑制するために、厚さ 0.5mm の無方向性珪素鋼板という特殊な鉄材をヨークに使用している [8]。

これらの機器より構成される RCS は入射したビームを 15,000 回程度周回させて、最終的に 3GeV まで加速した後、下流にあるビーム輸送系を通じて、物質・生命科学実験施設及び MR に射出する。3 GeV まで加速するのにわずか 20msec しかかからないので、1 秒間に 25 回もの新しいビームを加速することができ、平均電流 $333\mu\text{A}$ 、電力 1 MW が可能である。2009 年 11 月 10 日からは MLF の共同利用実験のために、陽子ビーム強度 120 kW の定常運転が開始された。

詳細な RCS のパラメーターを表 2.2 に示す。

Parameter		Value
Circumference		348.333m
Average Radius		55.44m
Injection Energy		181MeV / 400MeV
Extraction Energy		3GeV
Particle Per Pulse		8.3×10^{13}
Revolution Period		
	at Injection	1.629 μs
	at Extraction	1.196 μs
Repetition Rate		25Hz
Ramping Pattern		Sinusoid
	Injection	$\sim 500\mu\text{s}$
	Acceleration	20ms
	Decreasing Field	20ms
Average Current		333 μA
Circulating Current		
	at Injection	8.2A
	at Extraction	11.1A
Bunching Factor		
	at Injection	
	fundamental	0.3
	with 2nd harmonics	0.4
	at Extraction	0.056
	for 3GeV users	0.2
	for 50GeV ring	0.3

表 2.2: RCS のパラメーター [6]

2.2.3 Main Ring(MR)

MR は三つの直線部と三つのアーク部から成り、概略三角形をした周長約 1567m のリングである。リング内部には 6 台+予備 1 台の加速空洞、96 台の偏向電磁石、216 台の四極

電磁石、72 台の六極電磁石、186 台の軌道補正電磁石が設置されている。各直線部にはリング内周側に電源棟が付置され、軌道電磁石電源をはじめ、MR で必要な全ての機器の電源がこれらの電源棟に収納されている (図 2.7)。電磁石の電源棟は三つあり、各電源棟の電力は等しくなるように電磁石の組み合わせが考慮されている。

MR の高周波加速空洞にも、RCS と同様に、ファインメットの箔帯を巻いて作られたコアを使用しているが、内径と外径が RCS のコアと異なり、径方向にカットしてギャップを作ることで Q 値の調節が行われている (図 2.8)。この高周波加速空洞 6 台を使い、合計で最大 280kV の電圧を発生させて、第 1 期では 30GeV までビームの加速を行う。加速周波数の範囲は 1.67~1.72MHz であり、RCS と比較して変化量が小さいので、空洞の Q 値はビーム負荷を考慮して、 $Q \sim 15$ となるように調節されている。この調節ではカットコアのギャップ間隔はおよそ 10mm 程度となる。詳細な MR のパラメーターを表 2.3 に示す。

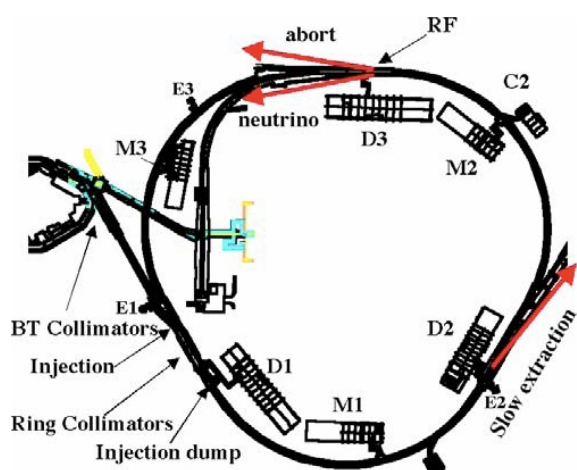


図 2.7: MR の構成図 [6]

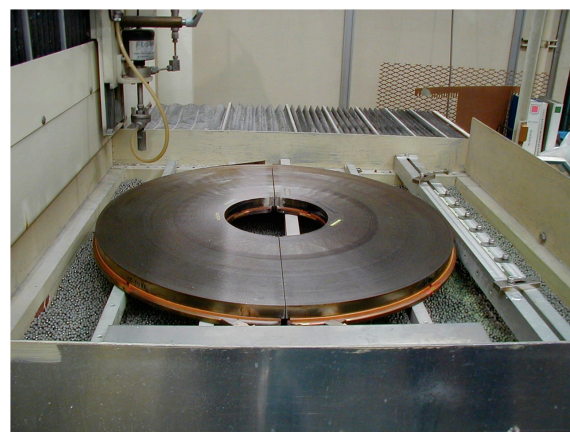


図 2.8: カットされた MR 用磁性体コア [14]

Parameter		Value
Circumference		1567.5m
Average Radius		249.475m
Injection Energy		3GeV
Extraction Energy		50GeV
Particle Per Pulse		3.3×10^{14}
Revolution Period		
	at Injection	$5.384 \mu\text{s}$
	at Extraction	$5.230 \mu\text{s}$
Repetition Rate		0.3Hz
Ramping Pattern		Parabola+Linear+Parabola
	Injection	0.17s
	Acceleration	1.96s
	parabola	0.13s
	linear	1.7s
	parabola	0.13s

表 2.3: MR のパラメーター [6]

第3章 RCS コアのシャントインピーダンス低下の原因究明

この章では RCS のシャントインピーダンスの低下の主原因の一つである座屈の原因究明のために、初めに磁性体コアの製造過程の説明を行う。次にこの磁性体コアの構造を考慮して汎用 FEM 連成解析ソフト ANSYS を使い、RCS の運転中に発生する熱応力の見積もり、及び改善方法について論じる。最後に、磁性体コアを切り出して作ったサンプルの圧縮試験より得られた座屈応力の閾値から熱応力シミュレーションの評価を行う。

3.1 磁性体コアの製作過程

RCS で使用しているコアは製造過程が若干異なる三種類のコア (Type1、2、3 と呼ぶ) が現在は使われている。この節では Type2 の製造過程について大まかな説明を行う。また、各 Type のコアの構造の違いは後に述べる (図 3.4 参照)。

1. ファインメットを巻き芯に巻く

磁性体コアはまず初めに熱処理前のファインメットの箔帯を内径 345mm、外径 375mm、厚み 35mm のステンレス製の円筒 (カラー) に直径が 850mm になるまで巻き付ける。このとき、箔帯の片側にシリカを塗布することで箔帯の層間に絶縁層を作る。また、巻くときは箔帯にかかるテンションと半径の積 (トルク) を一定にして巻く。この様にする事で層間絶縁が良く保たれ、コアの性能が出しやすくなる。コアが巻き終わったらレコード面にもシリカの塗布を行う。

2. 熱処理を行う

箔帯が巻き終わったコアを炉に入れて熱処理を行う。熱処理を行うことで箔帯中のアモルファスが図 3.1 に示すように成長し、ファインメット箔帯 (FT-3M) を巻いたコアになる。ここまでの作業は日立金属株式会社の工場で行われる。

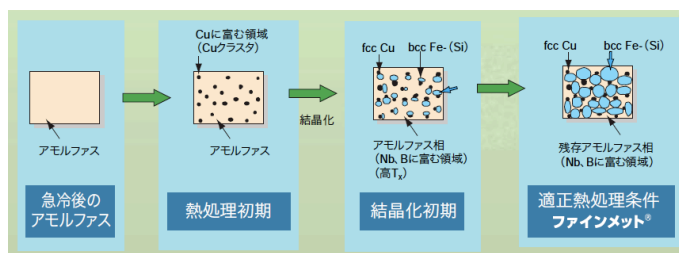


図 3.1: ファインメットの結晶化の模式図 [15]

3. 低粘度エポキシ樹脂による含浸

熱処理が終わったコアのカラーを外し、かわりに内径 371mm、外径 375mm、厚さ 35mm の FRP 製のカラーを入れる。カラーを交換したコアを容器に入れ、低粘度エポキシ樹脂に浸し、密閉する。次に容器内部の減圧と大気圧までの加圧を繰り返すことでファインメット箔帯の層間にエポキシ樹脂を含浸する。含浸した後、炉に入れて樹脂を硬化させる。

4. コア表面の防錆コーティングを行う

低粘度樹脂含浸を終えたコアのレコード面の片面に 180 μ m のガラスクロスをつけ、高粘度エポキシ樹脂を塗り、炉に入れて固める。片側が終わったらもう一方の面にもガラスクロスをつけ、高粘度エポキシ樹脂を塗り、炉に入れて固める。

5. 完成

以上の工程より図 2.6 に示したコアが完成する。

3.2 シャントインピーダンスが低下した RCS コアについて

平成 21 年 1 月に行われた RCS の空洞のインピーダンス測定により、一つの空洞で急激なシャントインピーダンスの低下が確認された。この空洞を解体したところ、磁性体コアに変形が見られた。この変形はコアの内径側に座屈しているものや表面のコーティングが剥がれているものが確認されている (図 3.2)。座屈は FRP カラーを曲げながら 1cm 程度の隆起となり、酷いものはファインメットの箔帯が破断している。これらのコアのシャントインピーダンスを測定したところ、座屈したコアのうち、箔帯が破断しているコアと錆びているコアはシャントインピーダンスの低下の起こしている事が確認された (図 3.3)。シャントインピーダンスの低下が起こるまでの運転時間は 1000 時間程度と言われている。

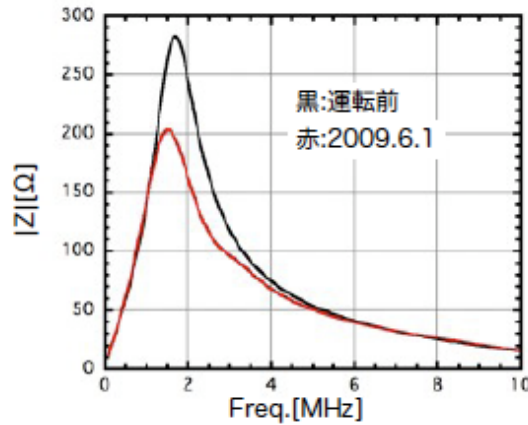


(a) 全体図

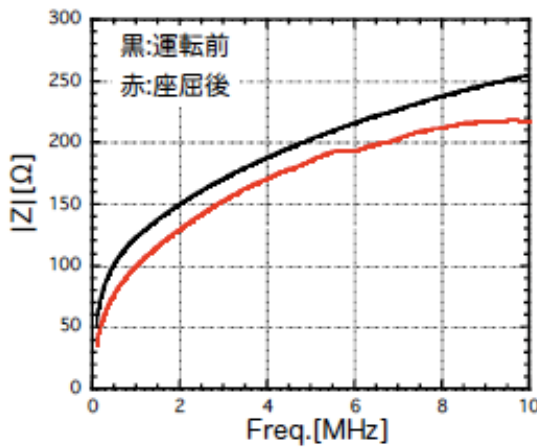


(b) 座屈部分の拡大

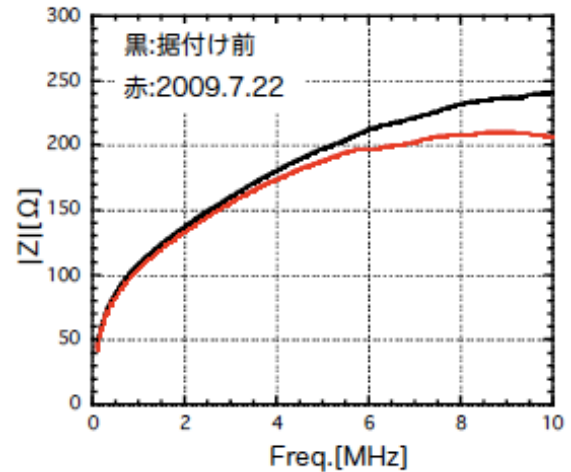
図 3.2: 座屈したコア



(a) シャントインピーダンスが低下した加速空洞



(b) 破断したコアのシャントインピーダンス



(c) 錆びたコアのシャントインピーダンス

図 3.3: シャントインピーダンスの低下^[17]

また、コアの構造の違いにより、座屈を起こすか、表面のコーティングだけが剥がれるか起こる現象が異なることが今までの調査からわかっている。現在、RCS で使われているコアは前節で製造工程を説明したもの以外に含浸を行っていないコアとレコード面のシリカの塗布を行っていないコアが有る。ここでは含浸を行っていないコアを Type1、前節で説明したコアを Type2、シリカの塗布を行っていないコアを Type3 として各コアの断面図を図 3.4 に示す。ちなみに、これらのコアのガラスクロスの厚みと構造だが Type1 は $50\mu\text{m}$ のものを使い、端は内側に折り畳んでいる。Type2 と Type3 のコアは $180\mu\text{m}$ のものを使い、端は折っていない。今のところ、座屈は Type3 のコアでのみ起こり、表面のコーティングの剥がれは Type2 のコアでのみ起こり、Type1 のコアではこれらの現象は確認されていない。今までの調査で解体された空洞内のコアで問題が起こったコアの数と総数をタイプごとに分けて表 3.1 に示す。

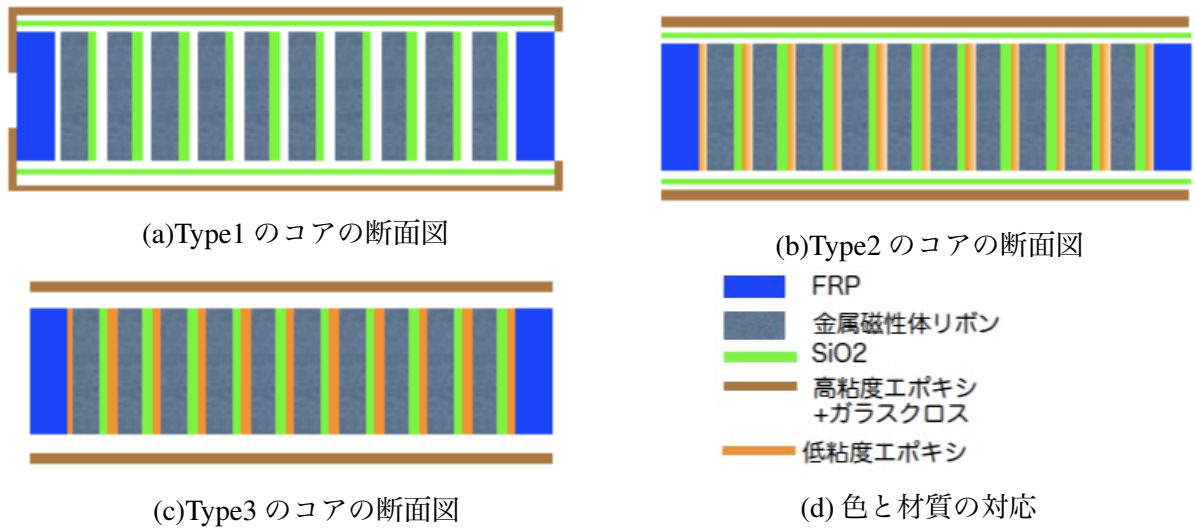


図 3.4: 各コアの構造^[17]

コアのタイプ	座屈	コーティングの剥がれ	総数
Type1	0	0	13
Type2	0	8	35
Type3	25	0	42

表 3.1: コアのタイプと発生した問題^[17]

3.3 磁性体コア内部の熱応力シミュレーション

座屈がなぜ起こるのか理解するためにコア内部の熱応力を ANSYS を用いてシミュレーションを行った。ANSYS は解析を行いたいモデルを作り、条件を指定する事で応力、伝熱、電磁場等について有限要素法を用いて解析を行うシミュレーションソフトである。熱応力シミュレーションでは Type3 のコアを想定して行う。磁性体コアはファインメットの箔帯の間に低粘度エポキシ樹脂が入っているがシミュレーションではこの構造をマクロ媒質的に扱ったモデルと箔帯とエポキシの積層構造を取り入れたマイクロ構造をそのまま取り入れたモデルの二種類で行った。

3.3.1 マクロ媒質モデルの概要

熱応力シミュレーションに用いるマクロ媒質モデルを図 3.5 に示す。

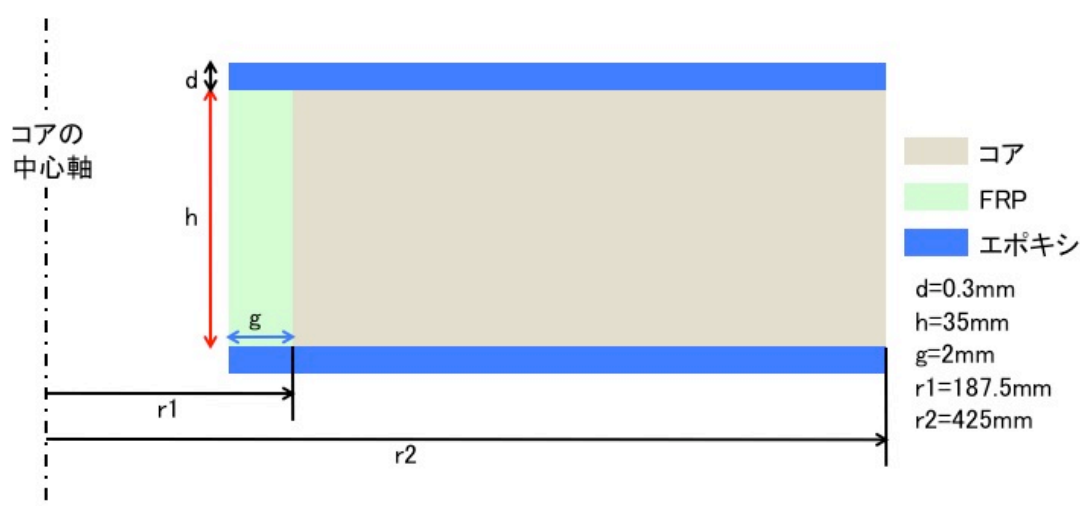


図 3.5: マクロ媒質モデルのコア

マクロ媒質モデルではファインメット箔帯と低粘度エポキシで構成されるコアを一様な物質として扱う。そのために、計算と測定から必要な物性値を求める必要が有る。この小節ではシミュレーションで用いる物性値とコアの発熱分布、コアのモデルを示す。

ファインメット箔帯と低粘度エポキシそれぞれ一層での層構造は図 3.6、3.7 になる。この図よりマクロ媒質モデルでは磁性体コアのヤング率は式 3.1、熱膨張係数は式 3.2、横弾性係数は式 3.3、3.4、に示す式を用いて計算する。

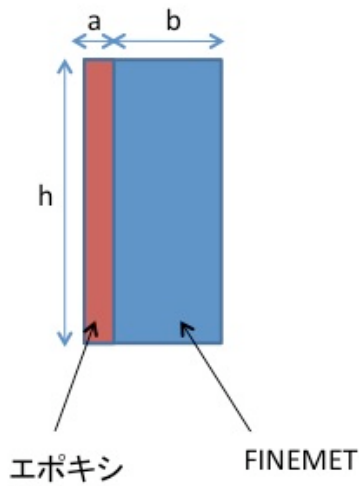


図 3.7: ファインメットとエポキシの層の平行なずれ

図 3.6: ファインメットとエポキシの層構造

磁性体コアのヤング率の導出式

$$\frac{1}{E} = \frac{a}{a+b} \frac{1}{E_e} + \frac{b}{a+b} \frac{1}{E_f} \quad (3.1)$$

$$E = 28 \text{ [GPa]}$$

磁性体コアの線熱膨張係数の導出式

$$\alpha = \frac{a}{a+b} \alpha_e + \frac{b}{a+b} \alpha_f = 16 \times 10^{-6} \text{ [/K]} \quad (3.2)$$

ファインメットの横弾性係数の導出式

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \gamma_i)} = 76 \text{ [GPa]} \quad (3.3)$$

エポキシの横弾性係数の導出式

$$G_e = \frac{E_e}{2(1 + \gamma_i)} = 1.2 \text{ [GPa]} \quad (3.4)$$

上記の式では以下の値を使用した。

エポキシのヤング率

$$E_e = 3.2 \text{ [GPa]} \quad (3.5)$$

ファインメットのヤング率

$$E_f = 200 \text{ [GPa]} \quad (3.6)$$

エポキシの線熱膨張係数

$$\alpha_e = 60 \times 10^{-6} \text{ [1/K]} \quad (3.7)$$

ファイナメントの線熱膨張係数

$$\alpha_f = 10.6 \times 10^{-6} \text{ [1/K]} \quad (3.8)$$

エポキシ層の厚み

$$a = 2 \text{ [\mu m]} \quad (3.9)$$

ファイナメント箔帯の厚み

$$b = 18 \text{ [\mu m]} \quad (3.10)$$

上記の計算結果と FRP、エポキシの物性値は表 3.2、3.3 にまとめて示す。

材質		線熱膨張係数 [10^{-6} /K]	ヤング率 [GPa]	ポアソン比	熱伝導度 [W/m/K]
磁性体コア	径方向	16	28	0.32	0.6 ^[3]
	その他	10.6	200	0.32	7.1 ^[3]
FRP ^[21]	径方向	23	7.8	0.32	0.4
	その他	7	7.8	0.32	0.8
エポキシ ^[21]		60	3.2	0.34	0.2

表 3.2: マクロ媒質モデルの物性値 1

材質		横弾性係数 [GPa]
磁性体コア	コア径方向垂直面	1.2
	その他の面	76

表 3.3: マクロ媒質モデルの物性値 2

ここでは FRP とエポキシの物性値はプラスチック基複合材料を知る事典の値、ファイナメントの物性値は日立金属株式会社の測定値を用いた。また、コアの熱伝導度は産業技術総合研究所にて測定した値を用いた^[3]。コアの横弾性係数は図 3.7 より層に平行な方向のずれには柔らかなエポキシが主な役割を果たすと考えられるので、層に平行な面の横弾性係数は 1.2[GPa]、その他の方向のずれは FINEMET が主になると考えられるので、その他の面の横弾性係数は 76[GPa] とした。

RCS のコア一枚あたりの発熱量は約 6kW である。発熱分布は径方向の 2 乗に反比例するので、シミュレーションでは図 3.8 の発熱分布を用いる。

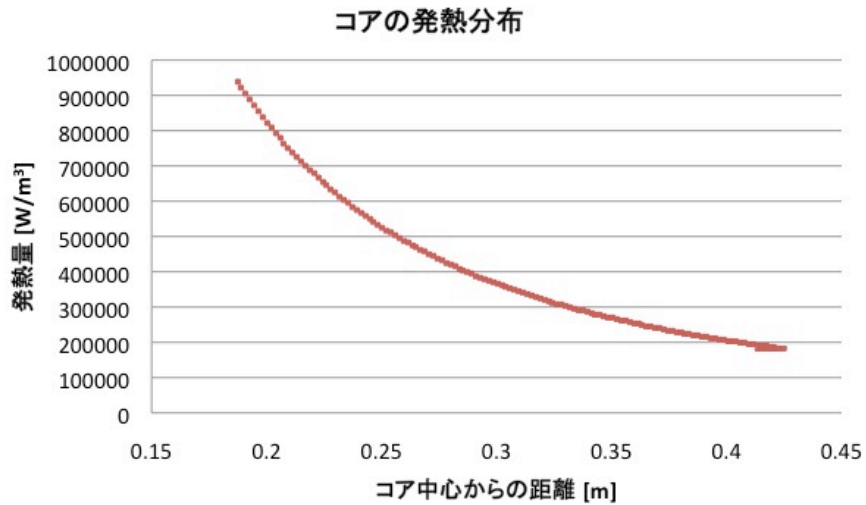
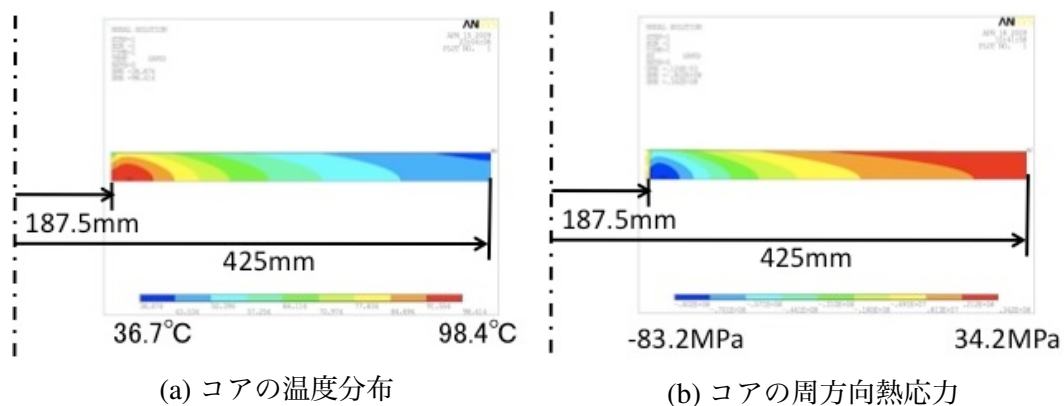


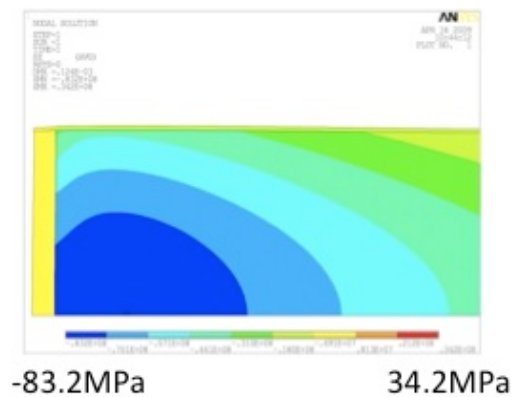
図 3.8: コアの発熱分布

コアの冷却は水を使い、直接冷却している。コア表面を流れる水の流速は水の流量と断面積から 0.1m/s である。タンクの形状からこの水の流速では層流域であるため、熱伝達係数は $500[\text{W}/\text{m}^2/\text{K}]$ になる (付録 B 参照)。シミュレーションでは防錆コーティングであるエポキシ層の表面に熱伝達係数を設定して冷却を行う。

3.3.2 マクロ媒質モデルの RCS コアの熱応力シミュレーション

前小節で示したマクロ媒質モデルを使い、RCS コアの熱応力をシミュレーションで求める。マクロ媒質モデルはコアの中心軸方向に対して真中で対称であるため、そこに対称条件を用いてシミュレーションを行う。また、周方向についても同様である。現在、J-PARC の RCS で使用されているコアを模した熱応力シミュレーションは次のようになる。





(c) コアの周方向熱応力 (図 (b) の拡大)

図 3.9: RCS コアの熱応力シミュレーション

図 3.9 では水の温度は 30 °C とし、内部応力が 0 になる温度も 30 °C とした。このモデルでは最大 83MPa の熱応力が発生している。

3.3.3 マクロ的手法を用いたコア内部の熱応力緩和に向けての改善案

前小節で示したコアの熱応力を下げるためにより冷却効率を向上させたものを考える。冷却効率を向上させるためには防錆コーティングを薄くする、水温を下げる、水を乱流域で使うこと等が挙げられる。水を乱流域で使用する理由は熱の伝わりやすさを表す熱伝達係数が層流域と比べて格段に良くなるためである。これは層流域では熱伝達係数は流速に殆ど依存しないが、乱流域では依存性を持つためである。また、流体の状態が層流なのか乱流であるかを決める要素にレイノルズ数という無次元量がある。これは流路の構造と流速、流体の物性値から求まり、一般的にレイノルズ数が 2300 よりも大きいときの流体は乱流になる (付録 B 参照)。この小節では水の流速ごとに各条件のコアの最高温度を示し、熱応力は構造的には冷却効率が最も良くなる防錆コーティングを行わないもののみを示す。使用する水の流速と熱伝達係数は表 3.4 になる。

流速 [m/s]	状態	熱伝達係数 [W/m ² /K]
0.1	層流	500
0.3	乱流	2190
0.4	乱流	2760
0.5	乱流	3300

表 3.4: 水の流速と熱伝達係数

各条件でのコアの最高温度と熱応力の最大値は次のようになる。

流速 0.1m/s、層流の場合

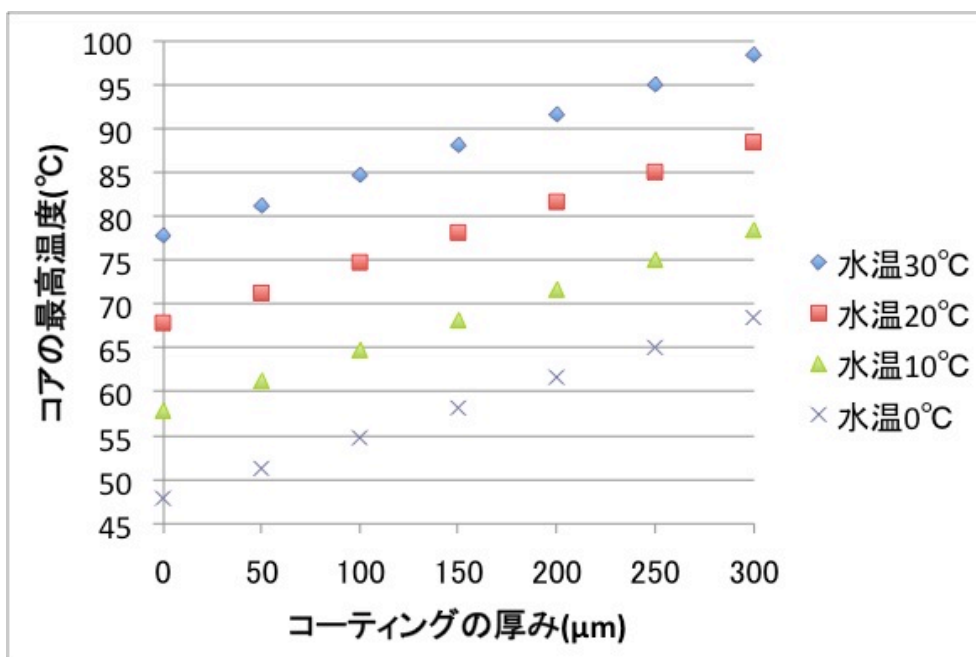


図 3.10: 流速 0.1m/s コアの最高温度

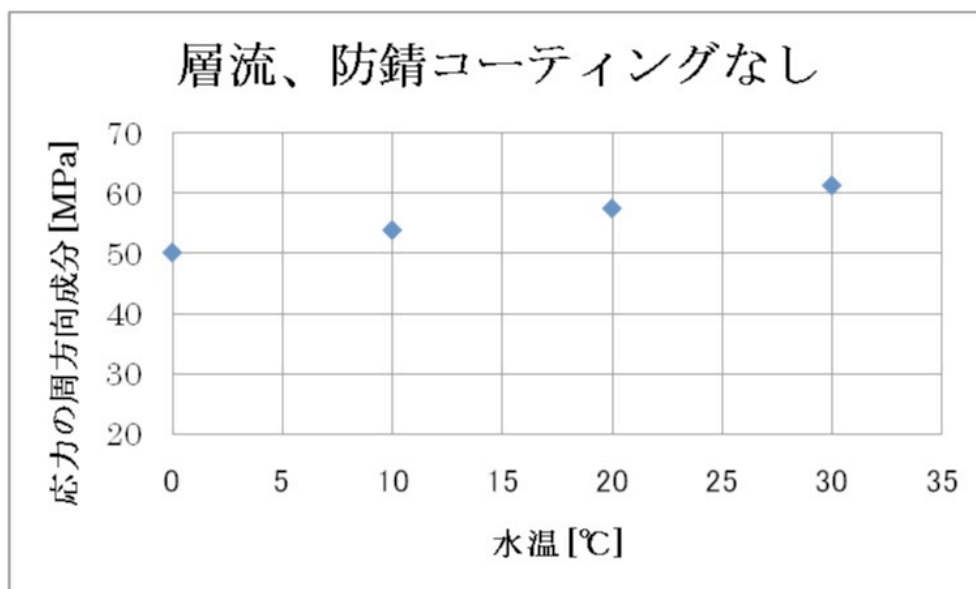


図 3.11: 流速 0.1m/s コーティングなしの場合の熱応力の周方向成分の最大値

流速 0.3m/s、乱流の場合

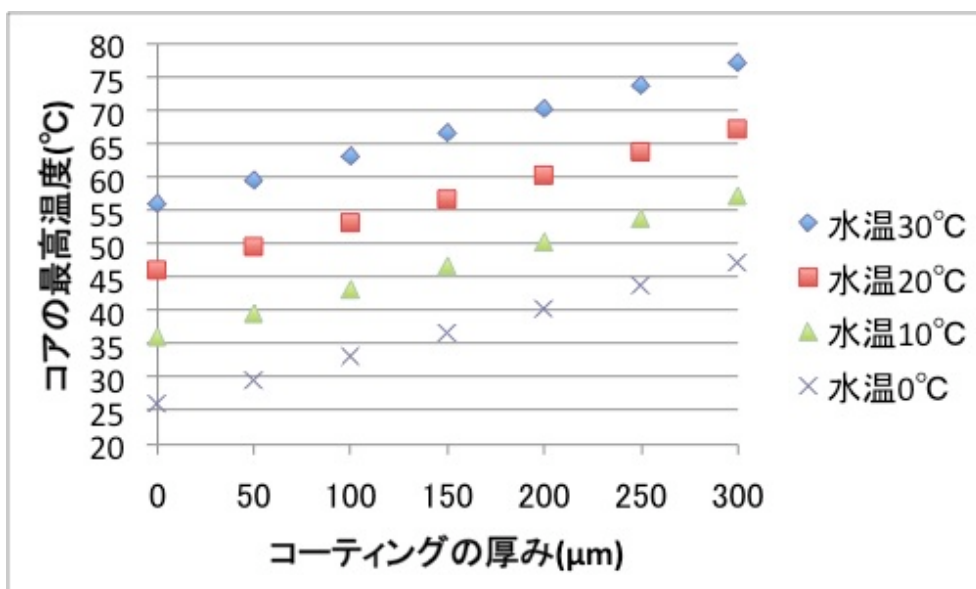


図 3.12: 流速 0.3m/s コアの最高温度

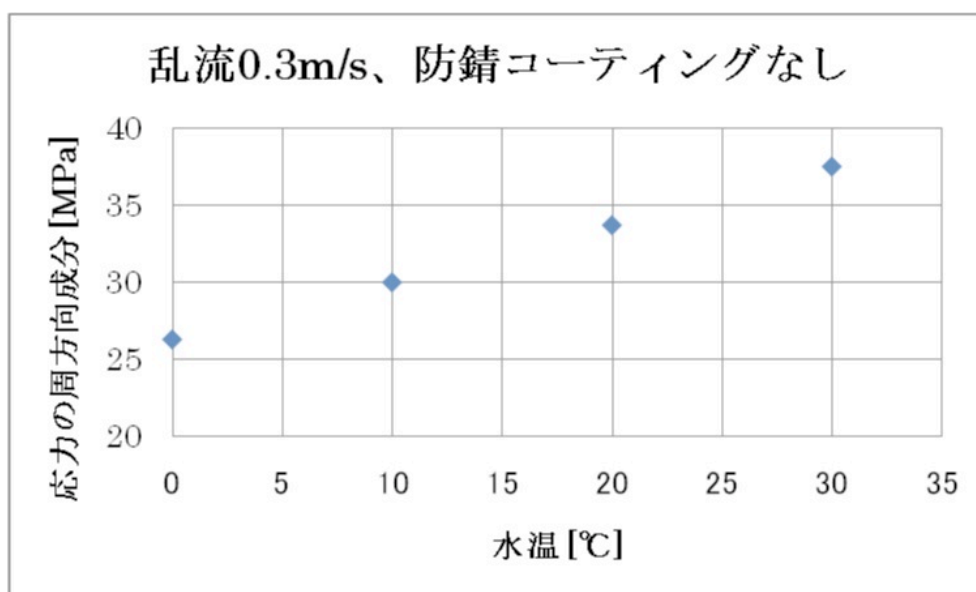


図 3.13: 流速 0.3m/s コーティングなしの場合の熱応力の周方向成分の最大値

流速 0.4m/s、乱流の場合

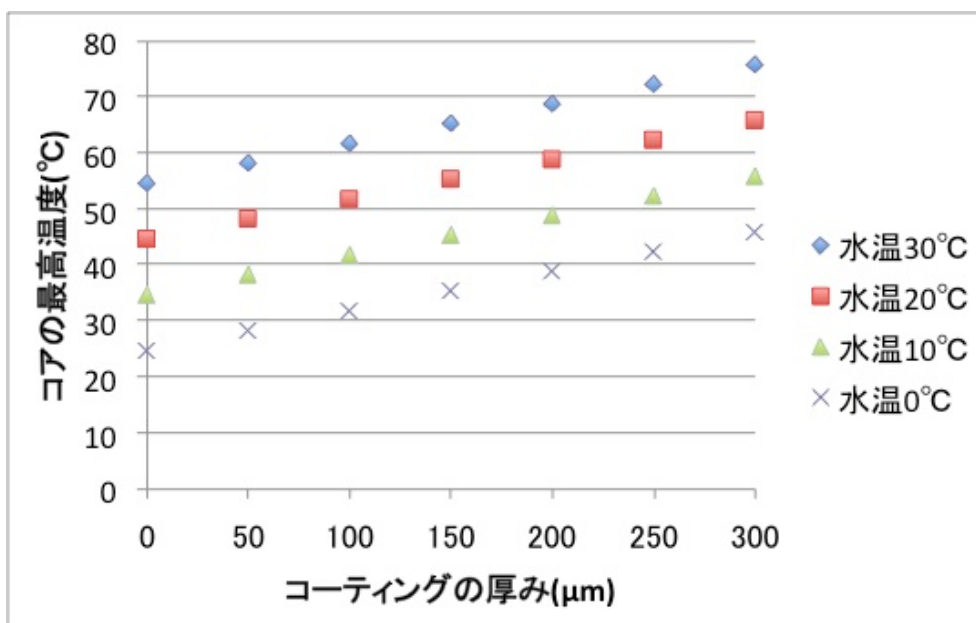


図 3.14: 流速 0.4m/s コアの最高温度

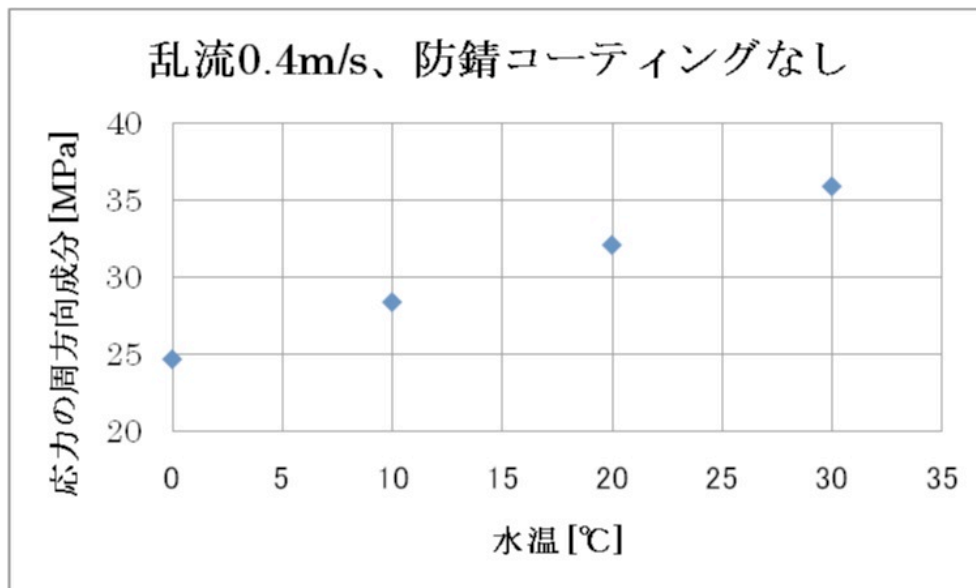


図 3.15: 流速 0.4m/s コーティングなしの場合の熱応力の周方向成分の最大値

流速 0.5m/s、乱流の場合

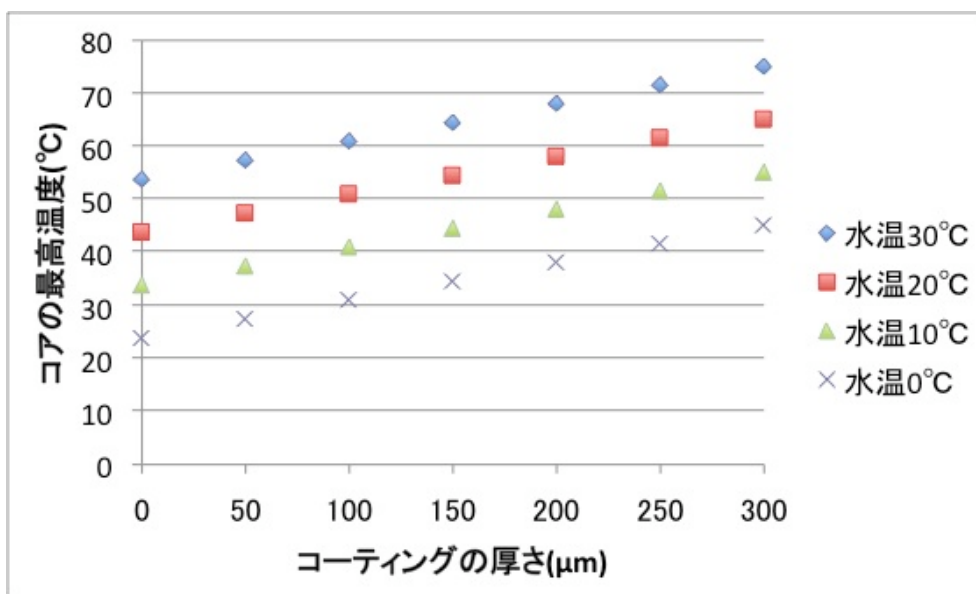


図 3.16: 流速 0.5m/s コアの最高温度

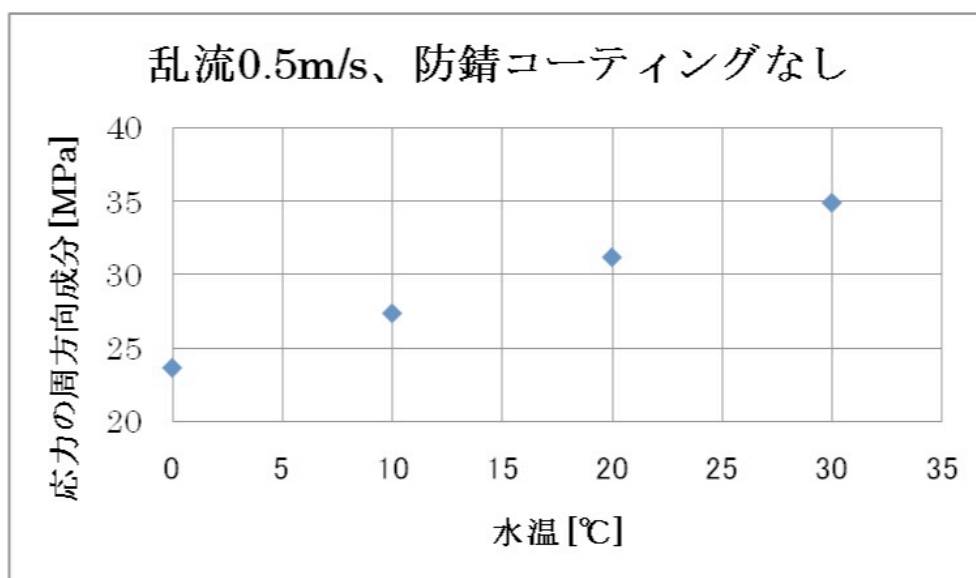


図 3.17: 流速 0.5m/s コーティングなしの場合の熱応力の周方向成分の最大値

図 3.10、3.13、3.15、3.17 を見比べるとわかるが、コアの最高温度とコーティングの厚み、水温には以下の関係が見られる。

コアの最高温度とコーティングの厚みと水温の関係

$$T_{max} = T_{min} + 7 \times 10^{-2} \times d + T_{water} \quad (3.11)$$

ここで T_{min} はコーティングの厚みが $0\mu\text{m}$ かつ水温が 0°C のときのコアの最高温度 [$^\circ\text{C}$]、 d はコーティングの厚み [μm]、 T_{water} は水温 [$^\circ\text{C}$] である。

熱応力について、層流では理想的な条件でも 50MPa、乱流は最も冷却効率の良い流速 0.5m/s では 24MPa まで下がるという結果が得られた。

3.3.4 ミクロ構造を取り入れたモデル

前小節までは磁性体コアをマクロ媒質的に扱って RCS のコアに発生する熱応力をシミュレーションから見積もってきた。この小節ではコアのミクロ構造を再現することでより現実に近い熱応力シミュレーションを行う。また、ファインメットの層間に入っている低粘度エポキシ樹脂の経年変化による劣化を考慮してヤング率を変えてシミュレーションも行う。

まず始めに磁性体コアのファインメットとエポキシの積層構造を入れたモデルの概略図を図 3.18 に示す。

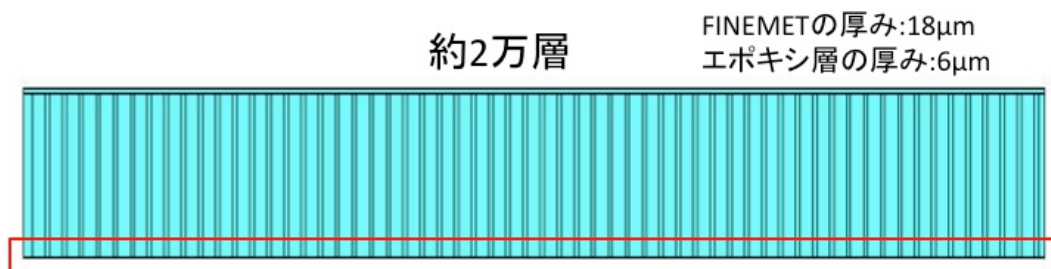


図 3.18: ミクロ構造を取り入れたモデルの概略図

この構造だとファインメットの層(一層あたり $18\mu\text{m}$)とエポキシの層(一層あたり $6\mu\text{m}$)はそれぞれ約 1 万層も有り、ANSYS ではこのモデルを正しく作ることができない。そのため、コア中心部(赤枠で囲った部分)のモデルを作り、温度分布を与えてシミュレーションを行うことで、コア内部に発生する熱応力の最大値を見積もる。温度分布は 2000 層モデル(FINEMET $180\mu\text{m}$ 、エポキシ $60\mu\text{m}$ 、防錆コーティング $300\mu\text{m}$ 、FRP カラー 2mm)で計算したもの(図 3.19)を用いる。2000 層にした理由は、2 万層では全体のモデリングはできなかったが層の数を減らせば可能である事と計算時間やメッシュ等との兼ね合いから選んだ。また、シミュレーションに用いた物性値は表 3.5 に示す。

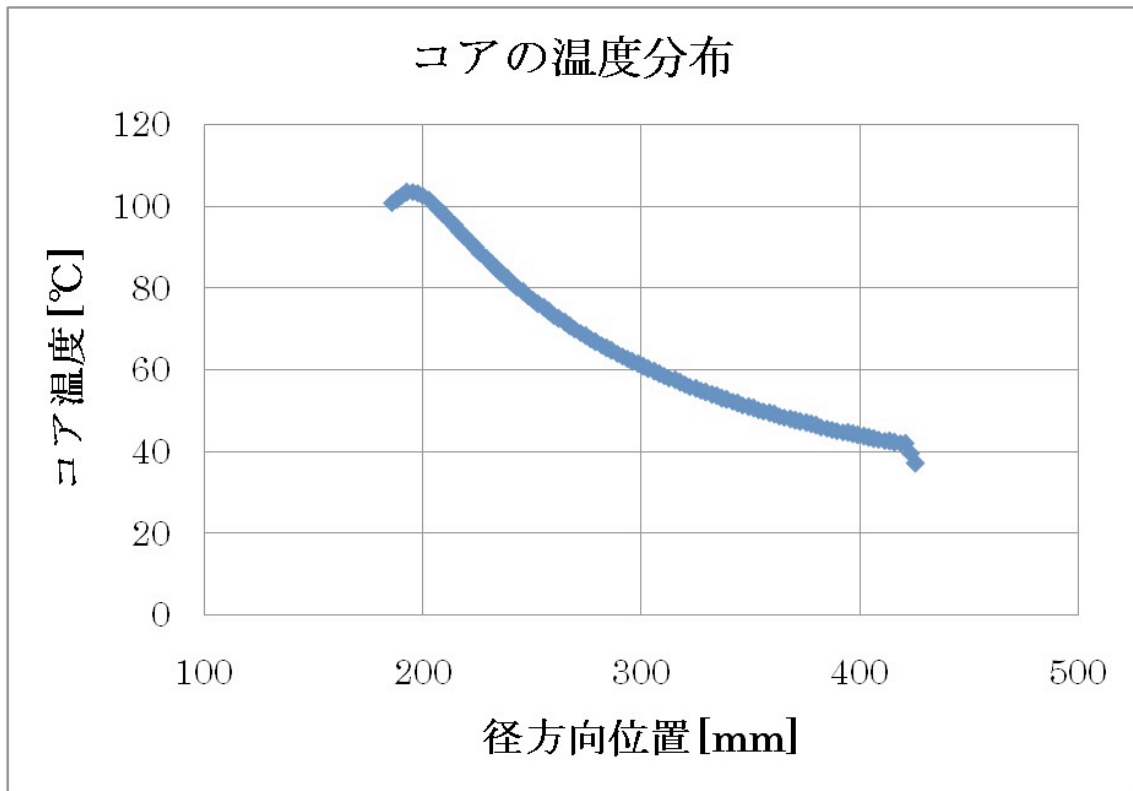


図 3.19: 2000 層モデルの温度分布

材質		線熱膨張係数 [$10^{-6}/K$]	ヤング率 [MPa]	ポアソン比	熱伝導度 [W/m/K]
ファインメット		10.6	200×10^3	0.32	7.1
エポキシ ^[21]		60	3.2×10^3	0.34	0.2
FRP ^[21]	径方向	23	7.8×10^3	0.32	0.4
	その他	7	7.8×10^3	0.32	0.8

表 3.5: ミクロ構造モデルの物性値

次にエポキシのヤング率を 100%、10%、1%と変化させて、それぞれのコアにかかる熱応力の周方向成分を見積もる。また、熱応力はコアを構成する材質ごとにわけて表示した図も示す。

エポキシのヤング率 100%

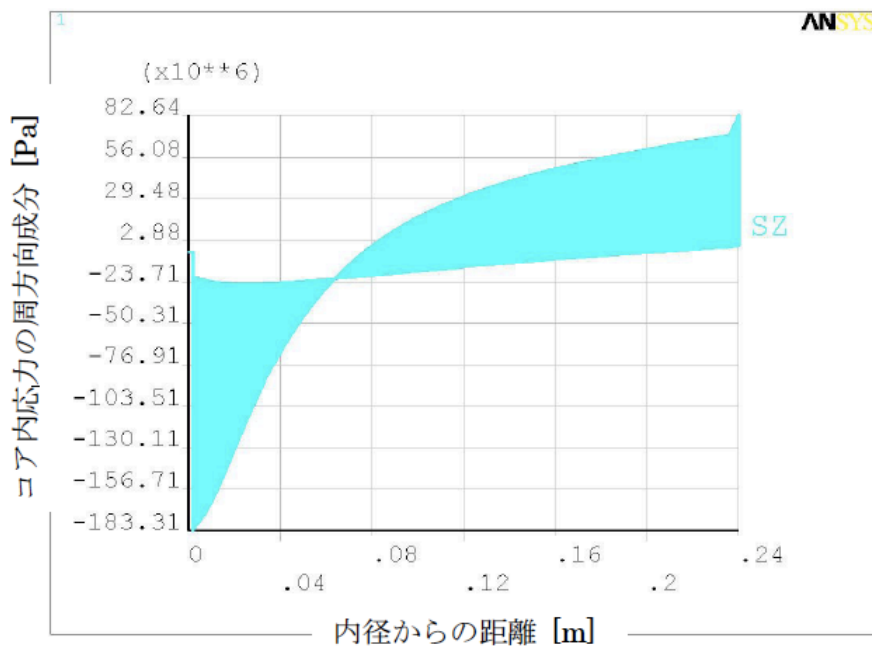


図 3.20: エポキシ層のヤング率 100%のときのコア内応力の周方向成分

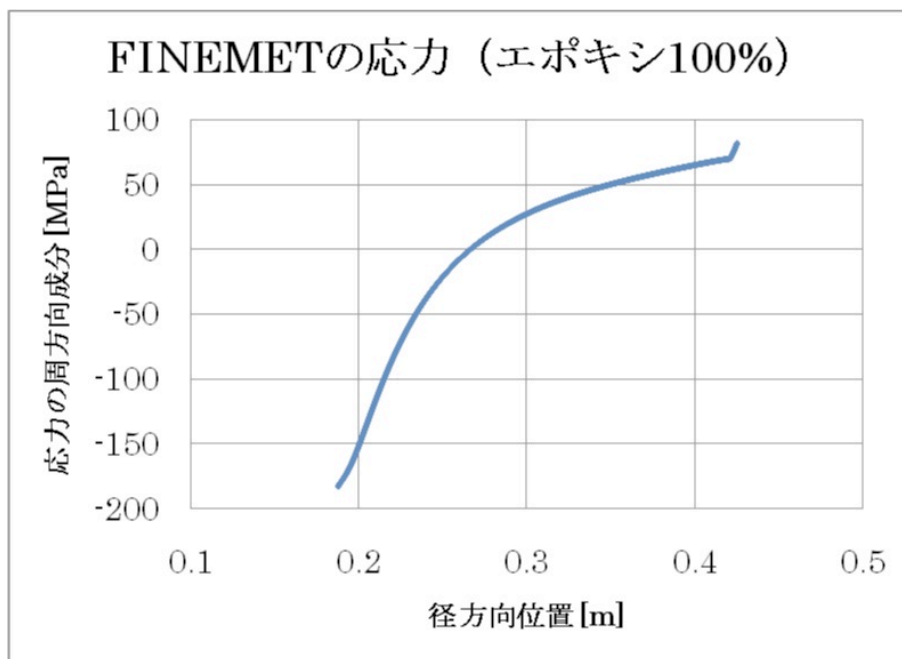


図 3.21: エポキシ層のヤング率 100%のときのファイナメットにかかる応力の周方向成分

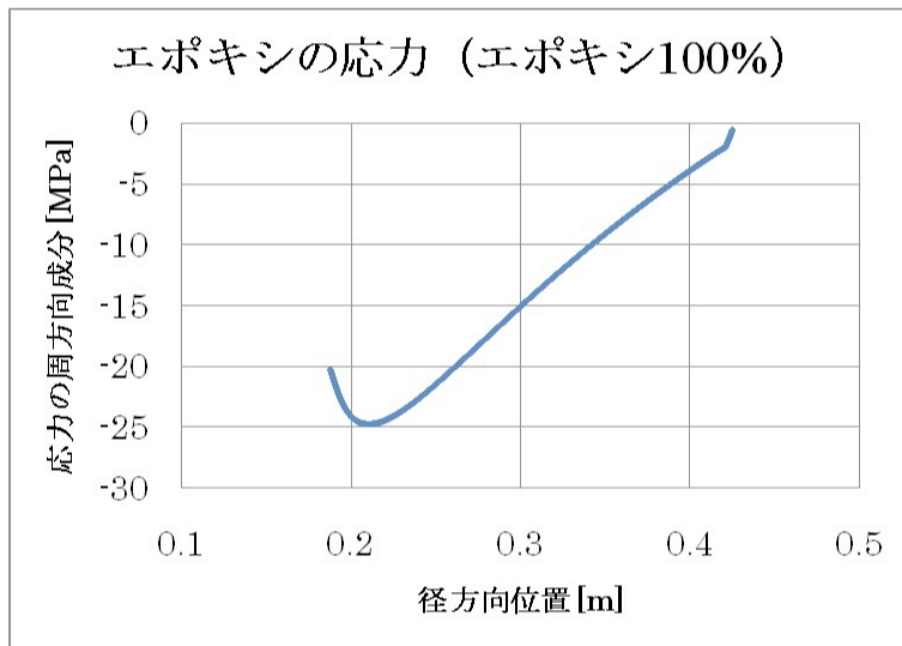


図 3.22: エポキシ層のヤング率 100%のときのエポキシ層にかかる応力の周方向成分

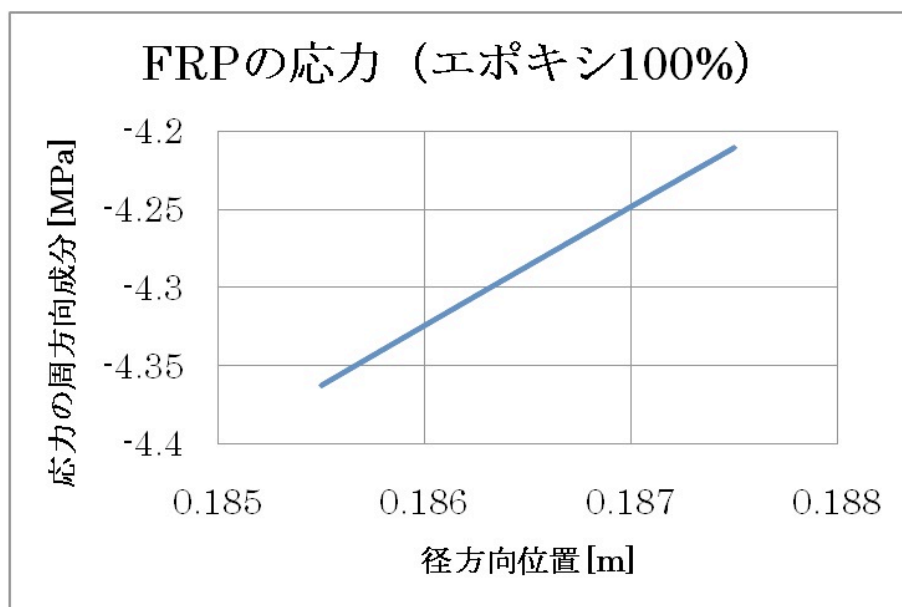


図 3.23: エポキシ層のヤング率 100%のときの FRP にかかる応力の周方向成分

エポキシのヤング率 10%

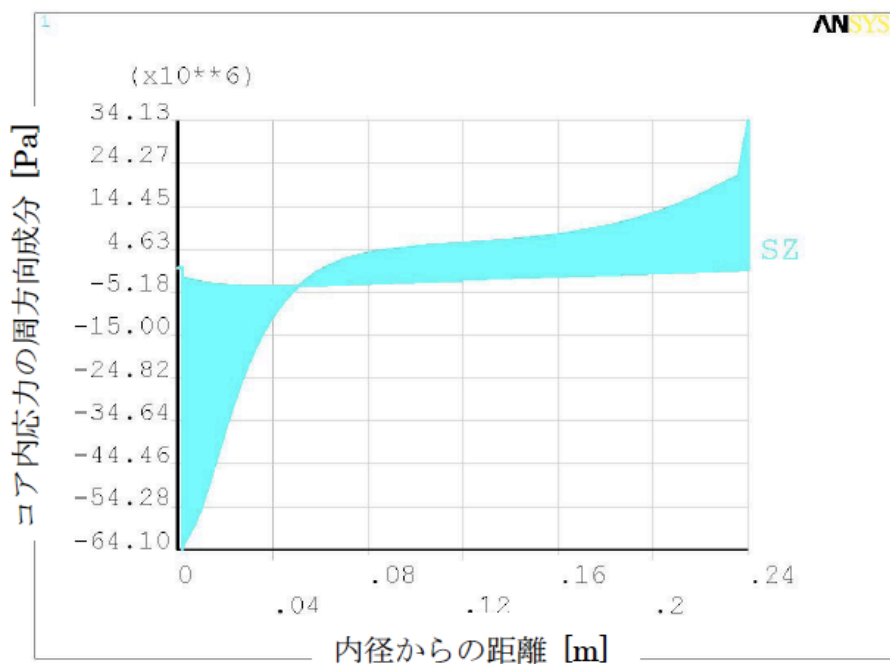


図 3.24: エポキシ層のヤング率 10%のときのコア内応力の周方向成分

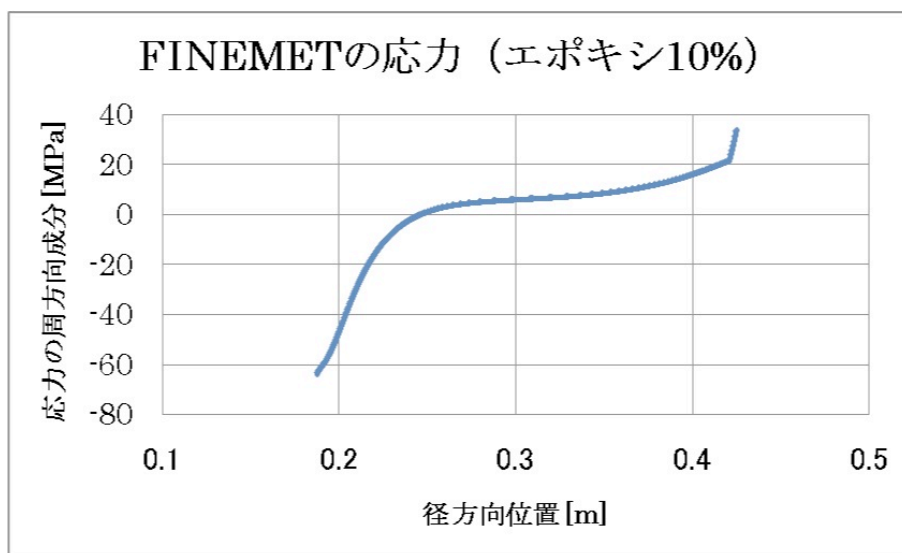


図 3.25: エポキシ層のヤング率 10%のときのファインメットにかかる応力の周方向成分

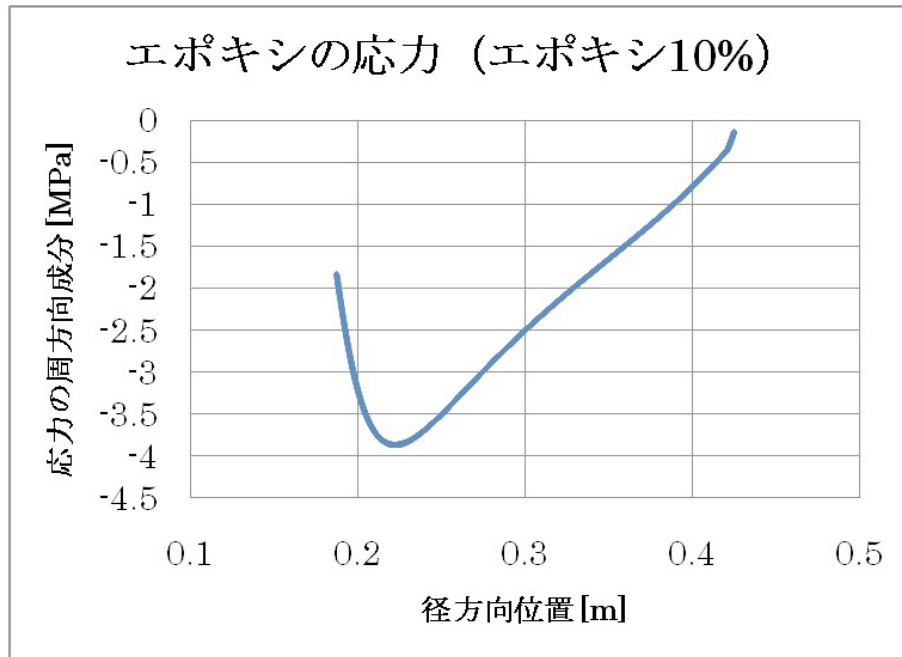


図 3.26: エポキシ層のヤング率 10%のときのエポキシ層にかかる応力の周方向成分

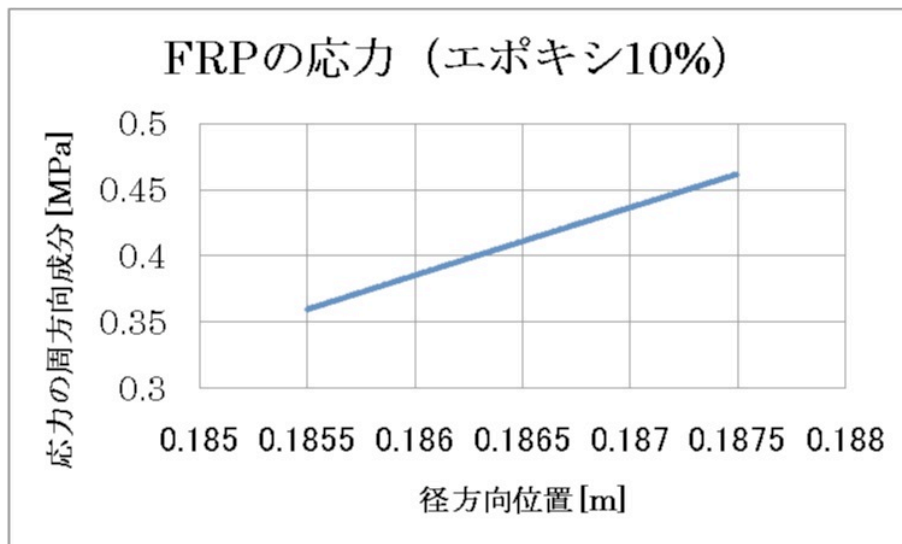


図 3.27: エポキシ層のヤング率 10%のときの FRP にかかる応力の周方向成分

エポキシのヤング率1%

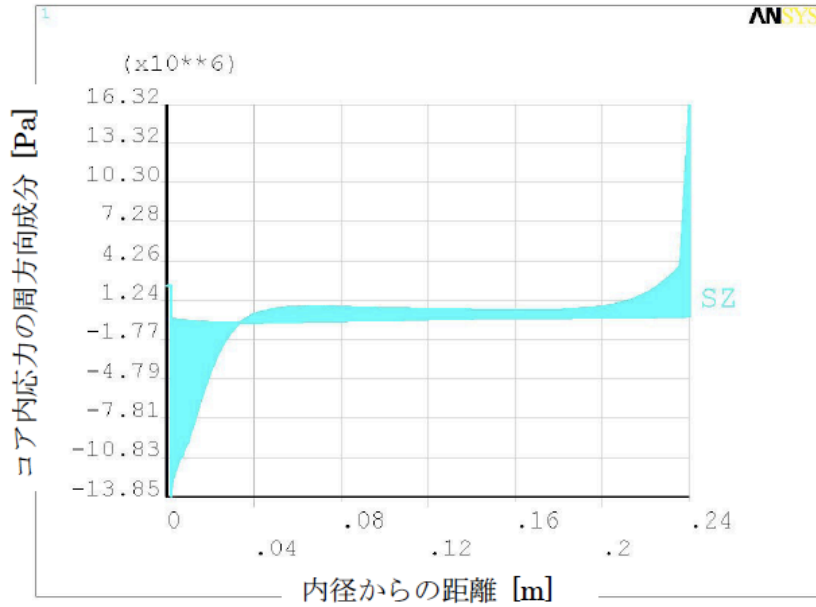


図 3.28: エポキシ層のヤング率1%のときのコア内応力の周方向成分

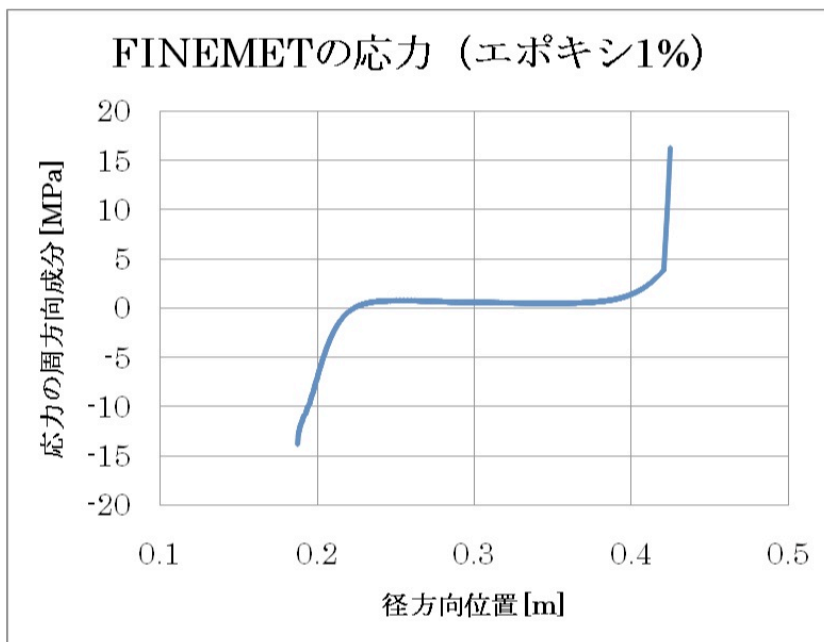


図 3.29: エポキシ層のヤング率1%のときのファイナメントにかかる応力の周方向成分

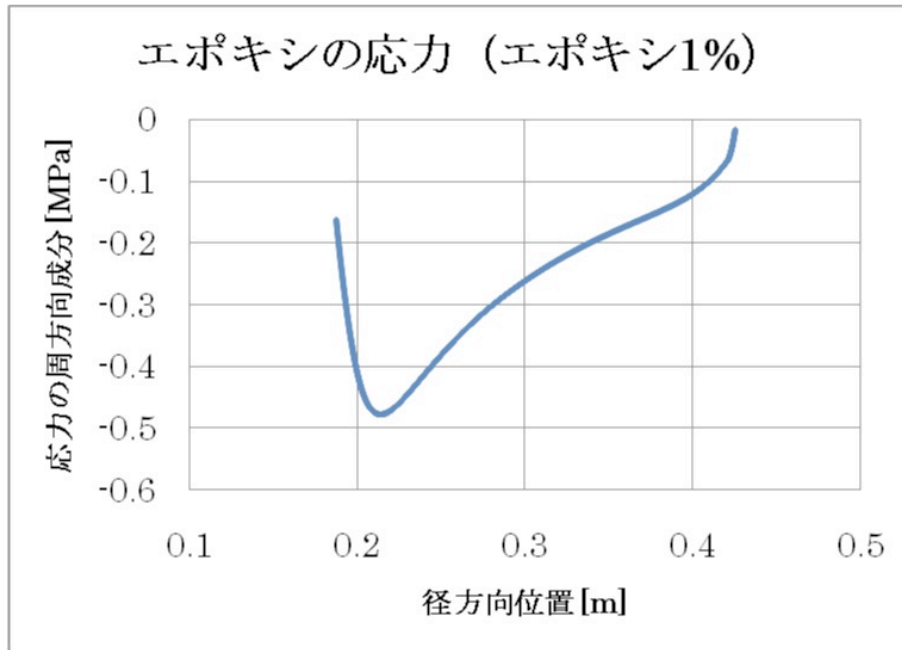


図 3.30: エポキシ層のヤング率 1% のときのエポキシ層にかかる応力の周方向成分

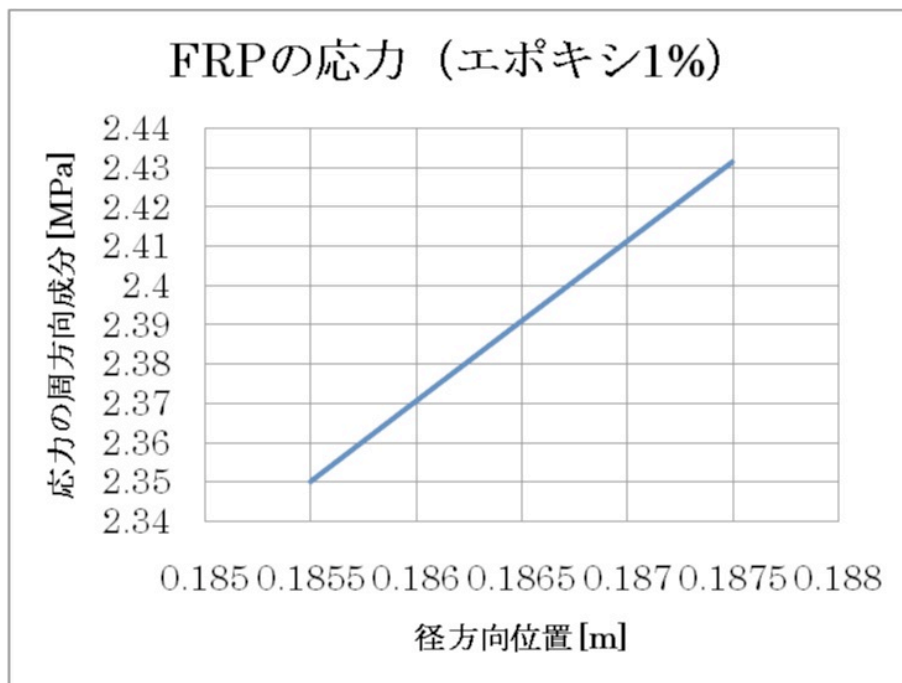


図 3.31: エポキシ層のヤング率 1% のときの FRP にかかる応力の周方向成分

図 3.21 よりファインメットにかかる熱応力の周方向成分は 180MPa となり、マクロ媒質モデルの 2 倍以上の応力がかかる結果となった。また、図 3.20、3.24、3.28 より低粘度エポキシ樹脂のヤング率を下げることで内部に発生する応力の周方向成分が全体的に小さくなることが理解できる。これらから、発生する熱応力の緩和の観点からは含浸に使う樹脂はヤング率の低いものを使うと良いことがわかる。

3.3.5 接触解析

樹脂が全くない場合を想定してファインメット箔帯のみを入力して接触解析を行った。これは前小節の 2 万層モデルのエポキシ層を抜き取ったモデルである。温度分布は図 3.19、ファインメット等の物性値は表 3.5 を使用する。この結果は図 3.32 に示す。

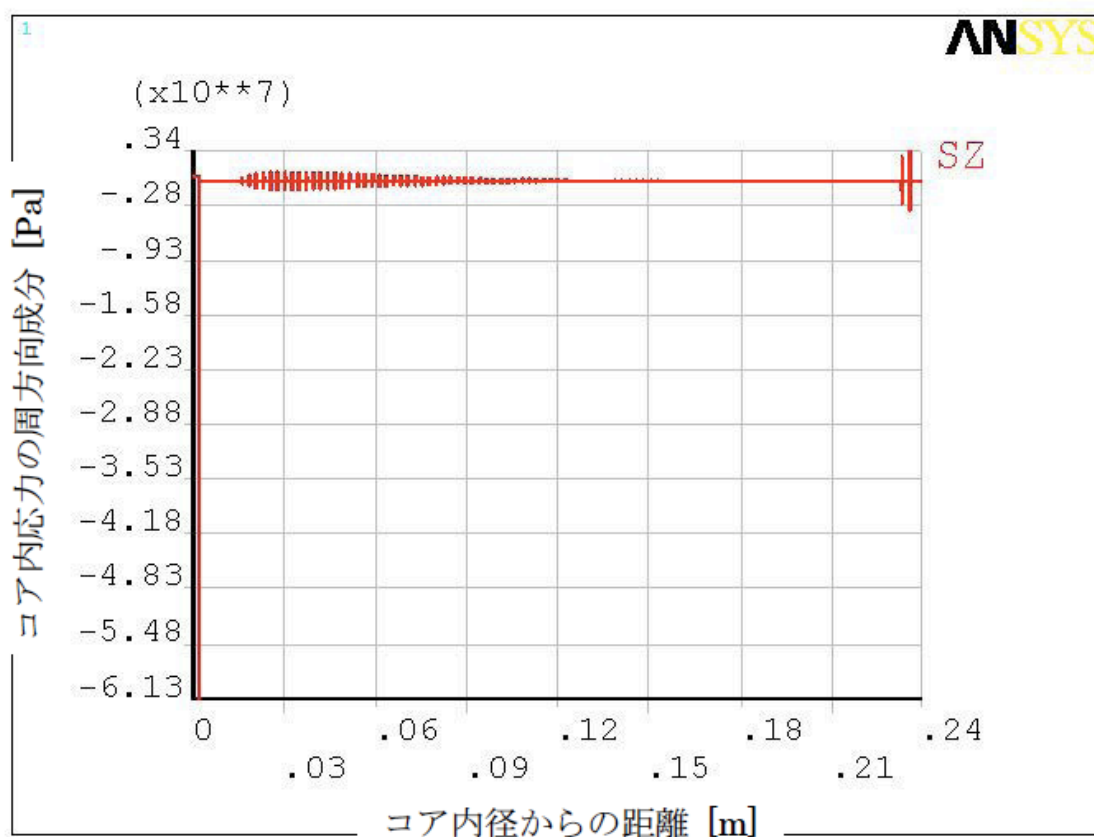


図 3.32: 接触解析の結果

コアの内径部分に 60MPa 程度の応力が見えているがこれは、モデリングのときに FRP のカラーと一番内径側のファインメットが接触していることとシミュレーションの対称条件で周方向に対称条件を課していることが原因だと考えられる。つまり、実際の未含浸コアと異なり、FRP の円筒とファインメットの円筒が接触している状態で温度分布を与えているためである。実際のファインメットは箔帯を巻いて作っているのでこの応力は存在し

ないので無視する。

図 3.32 には応力に周期的にスパイクが現れている部分が見て取れるのでこの部分を拡大したものを図 3.33 に示す。

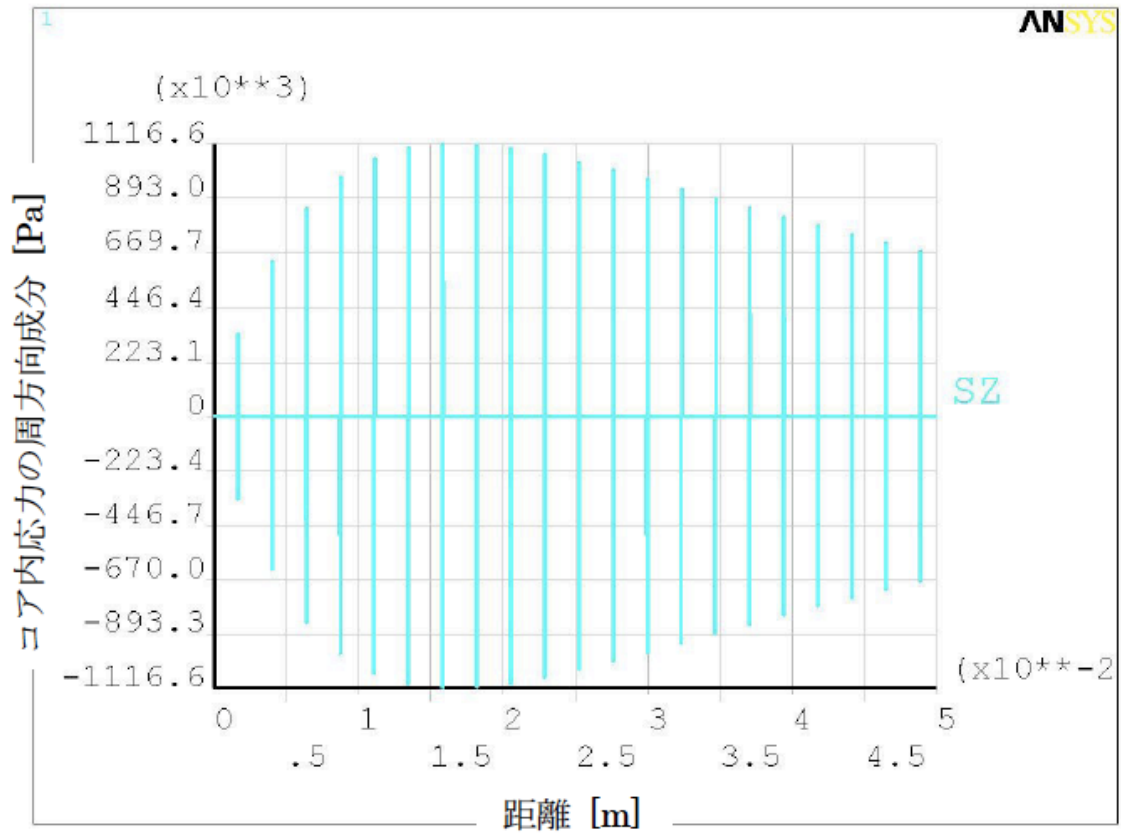


図 3.33: 図 3.32 の拡大

図 3.33 が一定間隔で応力が増減しているのは入力した温度分布が 100 点しかなく約 24cm ごとに温度が変化するのでその変化点で応力が表れるためである。もっと滑らかな温度分布を使用して再計算すれば応力は 1MPa 以下に抑えられると考えられる。また図 3.34、3.35 に接触部での FINEMET 箔帯にかかる応力の周方向成分及び変位量の様子を示す。

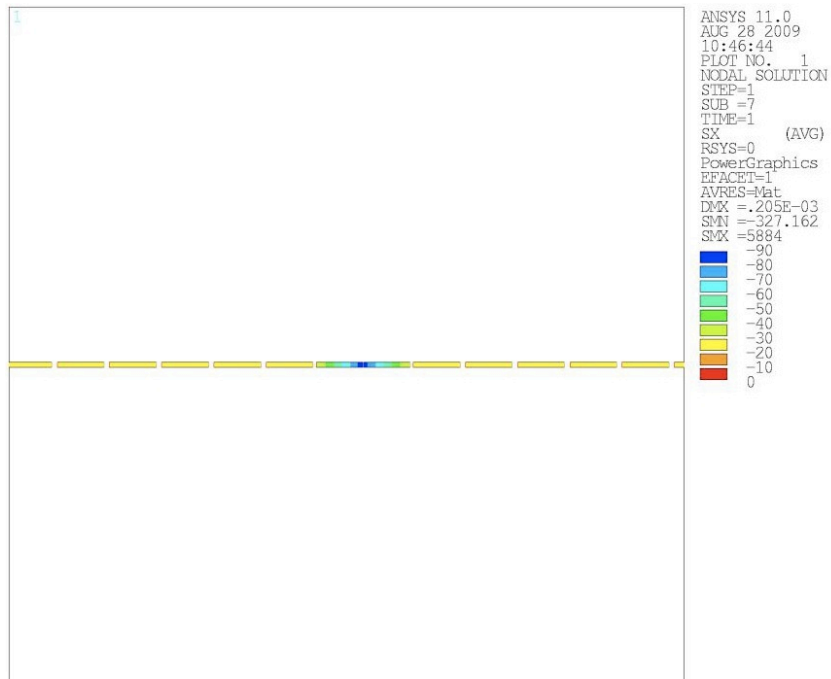


図 3.34: 接触部での応力の周方向成分

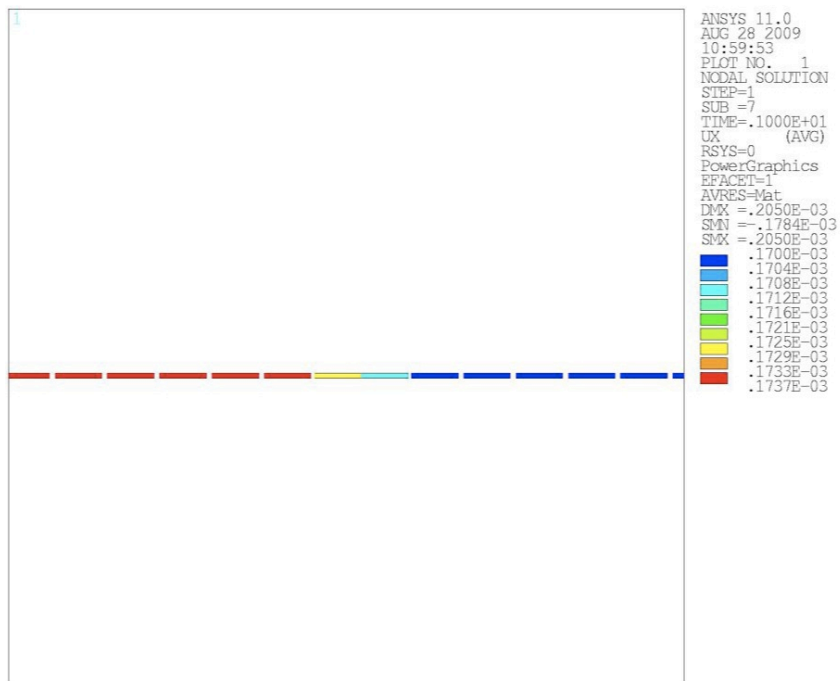
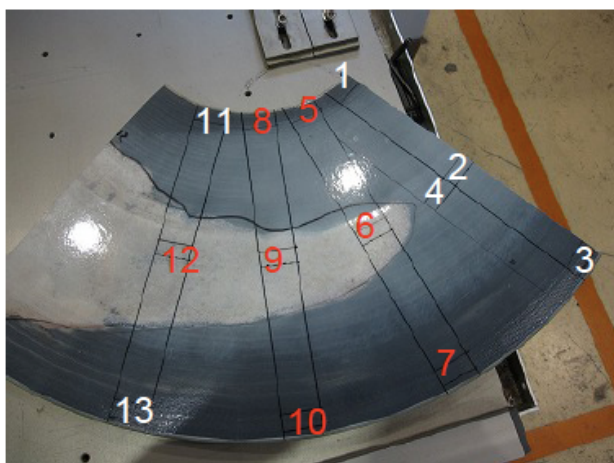


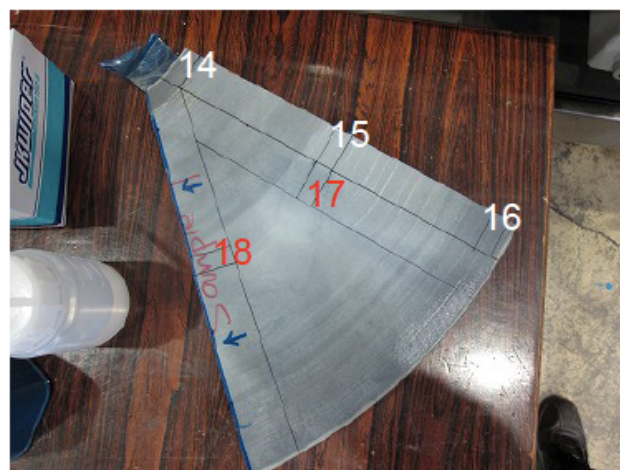
図 3.35: 接触部付近での FINEMET 箔帯の変位量

3.4 ファインメットコアの圧縮試験

RCSで使用しているコアの座屈応力を実験から見積もるために磁性体コアを切り出して作ったサンプルを圧縮して座屈を起こす応力を求める実験を物質材料研究機構で行った。実験に使用した磁性体コアのサンプルにはMR用に製作、使用されたコアを用いた。サンプルとして用いたMRの磁性体コアを図3.36に示す。



(a) 磁性体コアのサンプル 1



(b) 磁性体コアのサンプル 2

図 3.36: 磁性体コアのサンプル

RCS と MR では内径と外径が異なるが使用する材質が同じであるため、ファインメットの占積率がわかれば構造はほぼ同じになり、サンプルとして問題なく使用できる。このコアのカットは(株)リョーワのダイヤモンドソーを使用してサンプルの切り出しを行った。使用したサンプルは図3.36の白字の数字が書かれた部分を切り出して作った。赤字の数字が書かれている部分は防錆コーティングが剥がれて浮き上がっているため、水に触れた低粘度エポキシ樹脂が劣化している恐れがあるので使用しなかった。この様子を図3.37に示す。切り出したコアの一部は図3.38に示す。

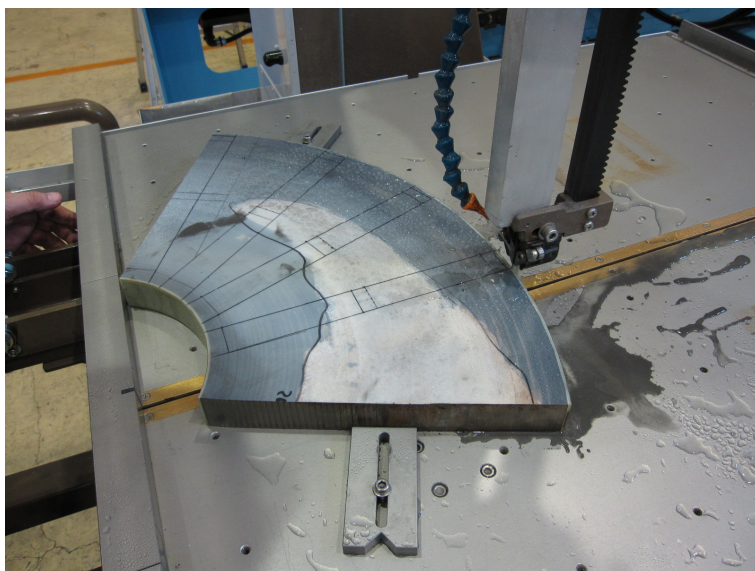


図 3.37: サンプルの切り出し



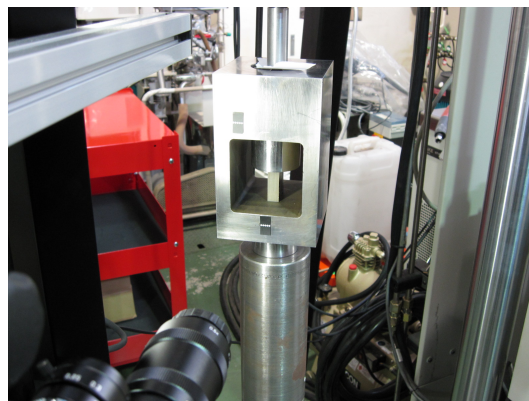
図 3.38: 圧縮試験のサンプル

圧縮試験は物質材料研究機構の鳥塚史郎氏、塚本雅敏氏、土谷悦子氏の御協力のもと行われた。実験装置一式は最大 10t の荷重がかけられる試験機と試験機に取り付ける圧縮用治具、サンプルの変位を観測する高精度カメラからなる (図 3.39)。この装置でサンプルに掛ける加重は図 3.40 のビーム軸方向であるが、これはファインメットとエポキシ層の構造より磁性体コアに周方向の圧縮応力をかけることに相当する。サンプルをセットし、荷重を掛けていくと図 3.41 に示すように座屈が起こる。このときの変位と荷重は図 3.42 に示す。他のサンプルも同様に荷重を掛けて座屈を起こす圧縮応力とサンプルのヤング率を求

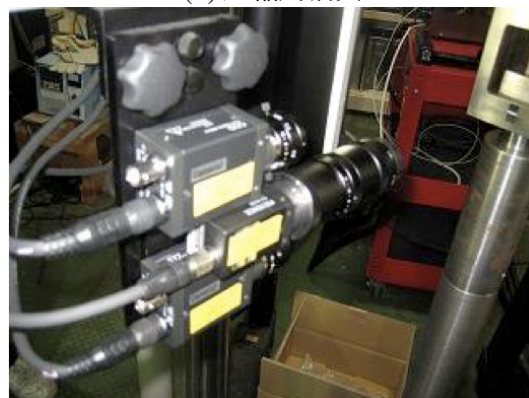
め、この実験結果を図 3.43 に示す。



(a) 試験機



(b) 圧縮用治具



(c) 高精度カメラ

図 3.39: 圧縮試験装置一式 (物質材料研究機構材料創製・信頼性グループ)

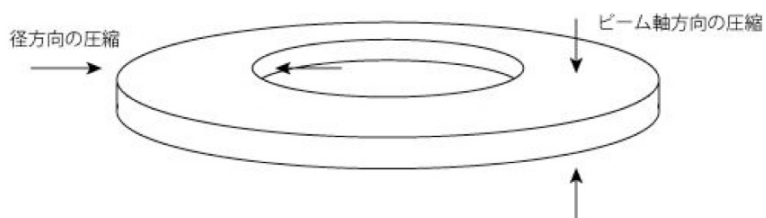


図 3.40: サンプルの圧縮方向



図 3.41: 座屈を起こしたサンプル

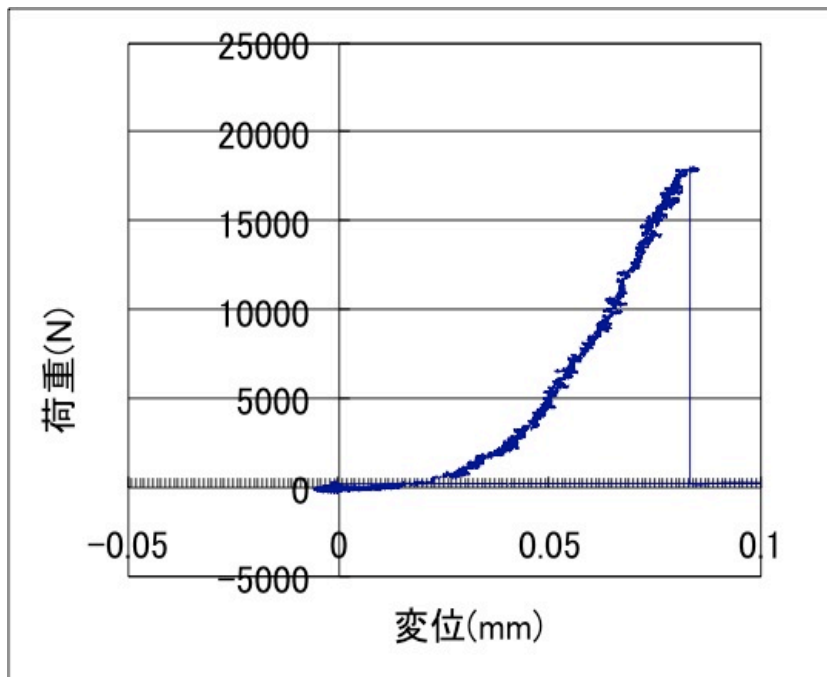


図 3.42: サンプルの変位と荷重

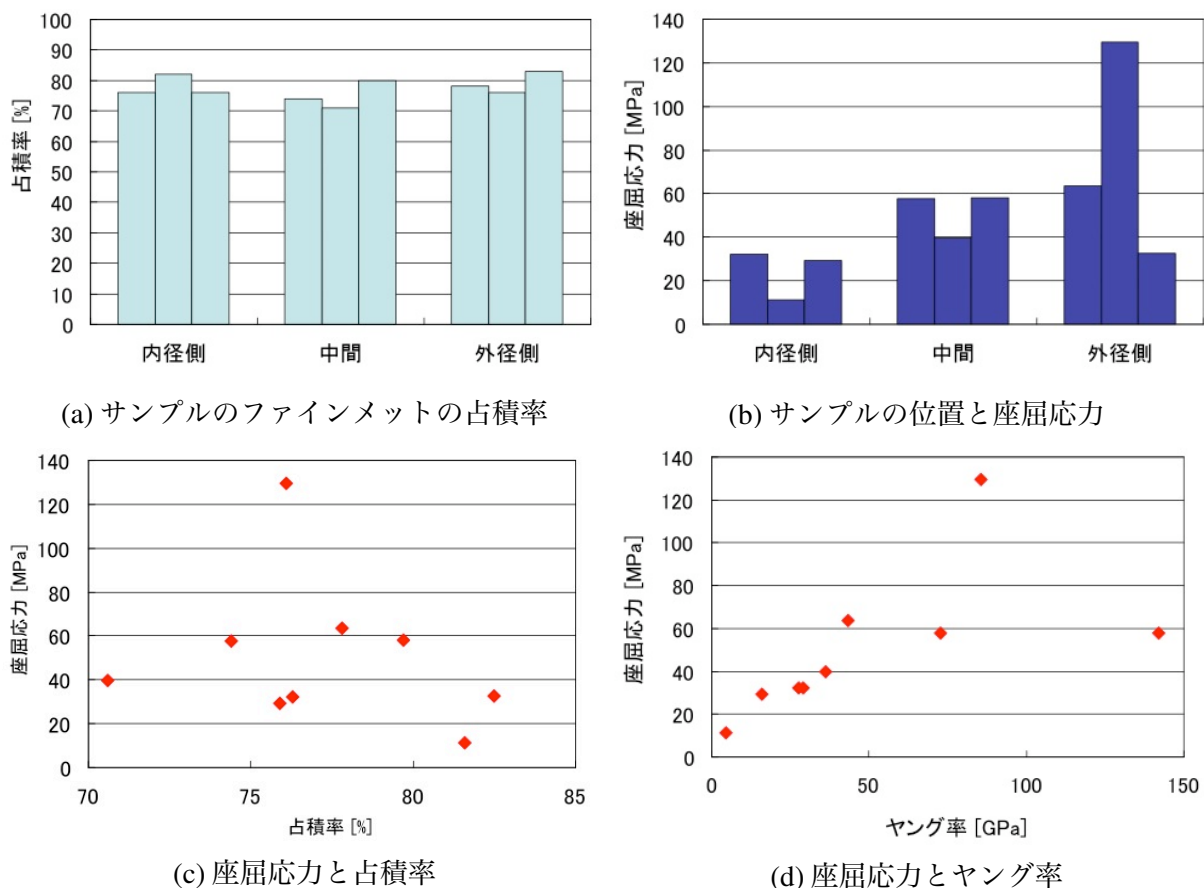


図 3.43: 圧縮試験の結果

実験結果よりサンプルの座屈応力と占積率、位置、ヤング率との間に関係性が見えない結果となった。これはファインメットを巻いて作ったコアの強度が不安定であるためだと考えられる。そのため、今回の結果では最小座屈応力が16MPaとなったことを踏まえて、コア内部に発生する熱応力の周方向成分は安全のために10MPa以下に抑える必要がある。また、図3.43では一つだけ座屈応力が120MPa以上のものがあるが、これは座屈を起こしたのではなく、圧縮破壊が起きたものである。このときの様子は図3.44に示す。

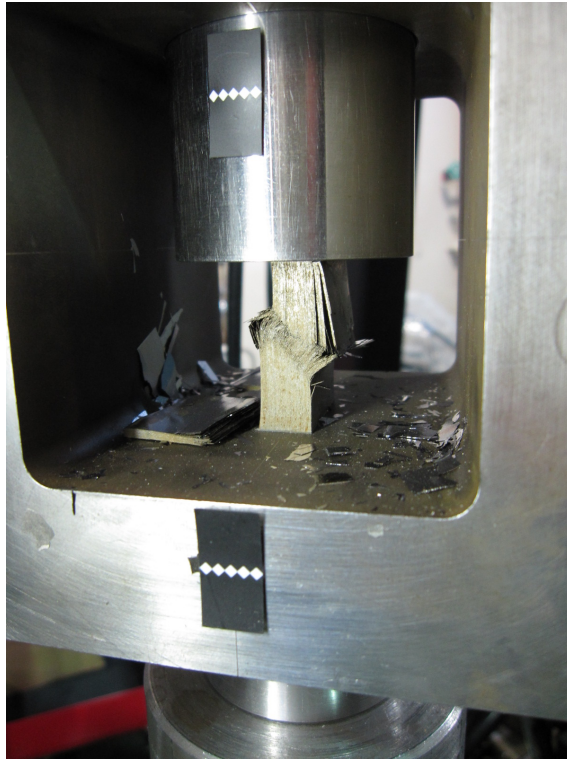


図 3.44: 圧縮破壊を起こしたサンプル

第4章 フロリナート液冷却式金属磁性体コア装荷加速構造

4.1 フロリナート液冷却式金属磁性体コア装荷加速構造の概要

前章の熱応力シミュレーションとサンプルの圧縮試験より磁性体コアに低粘度エポキシ樹脂含浸をしないことで座屈を防ぐことが可能になることがわかった。それを踏まえて、低粘度エポキシ樹脂含浸と防錆コーティングを行わないコアを使用した加速構造の設計、開発を東京大学山下研究室と KEK 影山達也教授、東京大学宇宙線研究所 亀田純氏が共同で行っている。この加速構造の特徴としてはフロリナートを冷媒として使用すること、磁性体コアを径方向に三分割し、磁性体コアのカラーを利用して流路を作ることなどが挙げられる。

安全性、冷却効率の面から理想的な冷媒は水であるが、鉄を主成分としたファインメットを冷却する冷媒には水腐食性をもたないことが要求される。この要求から冷媒の候補はフロリナート以外にノルマルパラフィン、ノベックがあった。表 4.1 にこれらの物性値を示す。

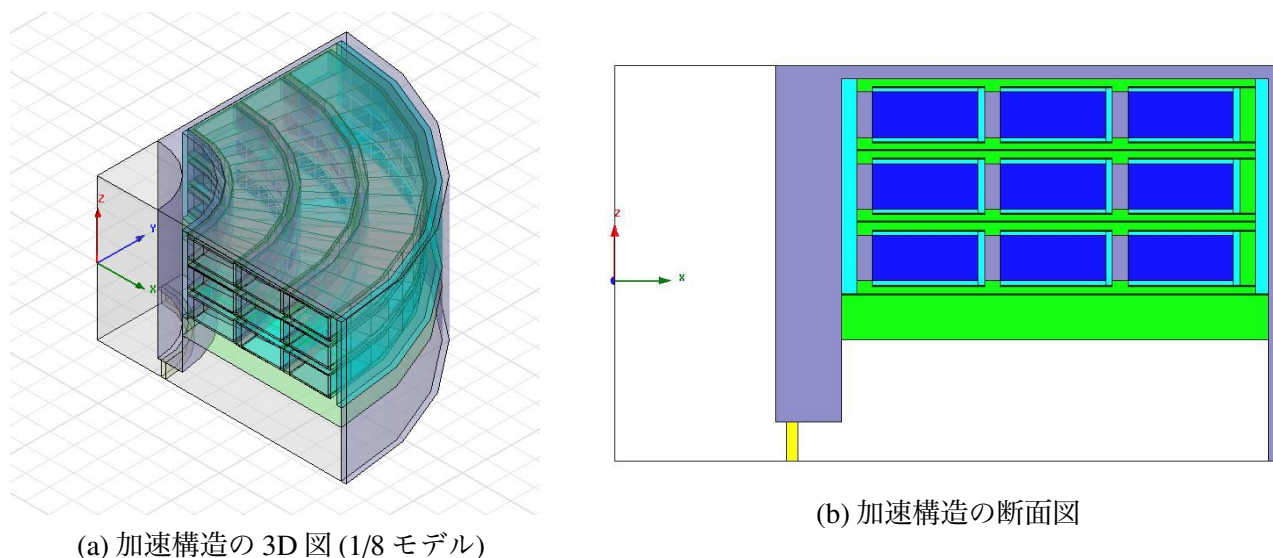
	フロリナート (住友 3M FC-3283)	ノルマルパラフィン (ENEOS Grade L)	ノベック (住友 3M HFE-7300)
化学式	$(C_3F_7)_3N$	$C_{11}H_{24}, C_{12}H_{26}$	$C_6F_{13}OCH_3$
沸点 [°C]	128	190~210	98
引火点 [°C]	-	71	-
密度 [kg/m ³]	1830	751	1660
動粘度 [m ² /s]	0.82×10^{-6}	1.36×10^{-6}	0.7×10^{-6}
比熱 [J/kg/K]	1050	2180	1137
熱伝導度 [W/m/K]	0.067	0.126	0.062
絶縁破壊電圧 [kV/2.54mm Gap]	43	30 ^[2]	27
比誘電率 (1kHz)	1.91	2.0	6.14
誘電正接 (1kHz)	$<4 \times 10^{-4}$	$\sim 1 \times 10^{-4}$	0.016

表 4.1: 比較検討した冷媒の代表的な物性値

ノベックは比誘電率と誘電正接が大きいことと分子式に酸素が入っているため、選定から漏れた。ノルマルパラフィンは安価で絶縁破壊電圧が高く、乱流域ではフロリナートと

冷却効率があまり変わらないが引火点をもつため、選定から漏れた。フロリナートは高価(1Lあたりの値段はノルマルパラフィンの値段の約40倍)であるがノルマルパラフィンと同様の利点を持ち、唯一の欠点だった引火点もない。そのため、フロリナートを冷媒に選定した。

開発を進めている加速構造は1/4λ同軸型加速構造を基本とし、加速ギャップあたり15kVの加速を想定している。この加速構造の概略図を図4.1に示す。



(a) 加速構造の3D図(1/8モデル)

(b) 加速構造の断面図

図4.1: 加速空洞の概略図

図4.1の(b)の各部位の材質と色の割り当ては表4.2になる。

	材質	色
磁性体コア	ファインメット	青色
加速構造外殻	ステンレス	灰色
コアのカラー	ステンレス	灰色
タンクと空気のしきり窓	FRP	黄緑
流路の構造物	FRP	黄緑
加速ギャップ	アルミナ	黄色
冷媒	フロリナート	水色

表4.2: 加速構造の構成要素

この構造に装荷する径方向に分割した磁性体コアの形状は図4.2になり、寸法は表4.3になる。図4.2に示したコア三枚をコア一式と呼ぶ。コア一式の表面に流路を形成するために二枚のFRP板と各コアのカラーを利用する。コア一式とFRP板を組み合わせた断面図は図4.3に示す。このコアは低粘度エポキシ樹脂による含浸を行わないので、コアを形成するファインメットの箔帯が垂れる恐れがある。そのため、FRP板とコアの間に形状を保持

するすのこ状の構造物 (以下すのこと呼ぶ) を約 45° おきに入れている (図 4.19 参照)。

	内径 [mm]	外径 [mm]
小コア	396	558
中コア	592	754
大コア	788	950

表 4.3: 各コアの寸法

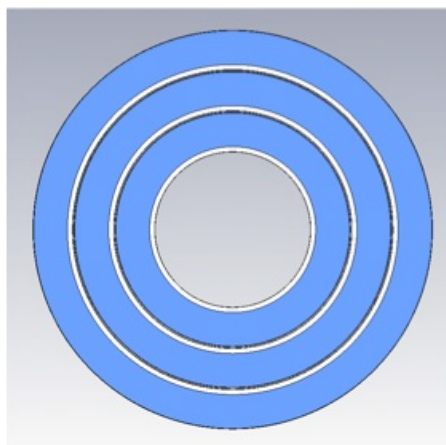


図 4.2: 分割コアの形状

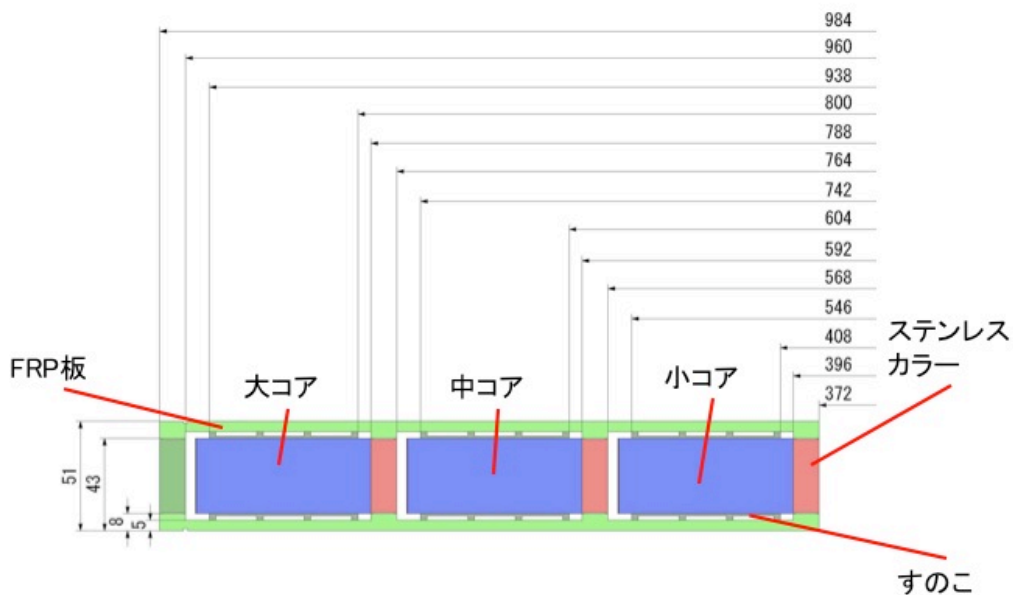


図 4.3: コア一式と FRP 板を組み合わせた断面図^[4]

図 4.3 に示したコア一式と FRP 板を組み合わせたものを加速構造 1 台のハーフセルでは 3 個装荷して使用する。

次にシャントインピーダンスを求める。式 A.13 を使い、計算すると径方向分割コア一式のシャントインピーダンスは 175Ω となった。比較のため、RCS のコア一枚についても計算をしたところ、シャントインピーダンスは 206Ω になった (付録 C 参照)。計算では径方

向分割コア一式は RCS のコアと比べて、シャントインピーダンスが少し低下してしまっている。

次にこの加速構造で要求される冷媒の流速を求める。コア一式では FRP と磁性体コアの間に隙間があり、これを流路として活用する。流路の幅はコアの厚みより 81mm、高さは FRP と磁性体コアの間の隙間より 3mm、これらから代表長さは $5.8 \times 10^{-3} \text{m}$ になる。以上から流路で乱流を作るのに必要な代表速度 U は

$$U = \frac{2320 \times 0.82 \times 10^{-6}}{5.8 \times 10^{-3}} = 0.33[\text{m/s}] \quad (4.1)$$

なので臨界流速は 0.33m/s となり、この速度以上の流速が必要になる (付録 B 参照)。また、全体の冷却システムとしては図 4.4 に概略図を示す。

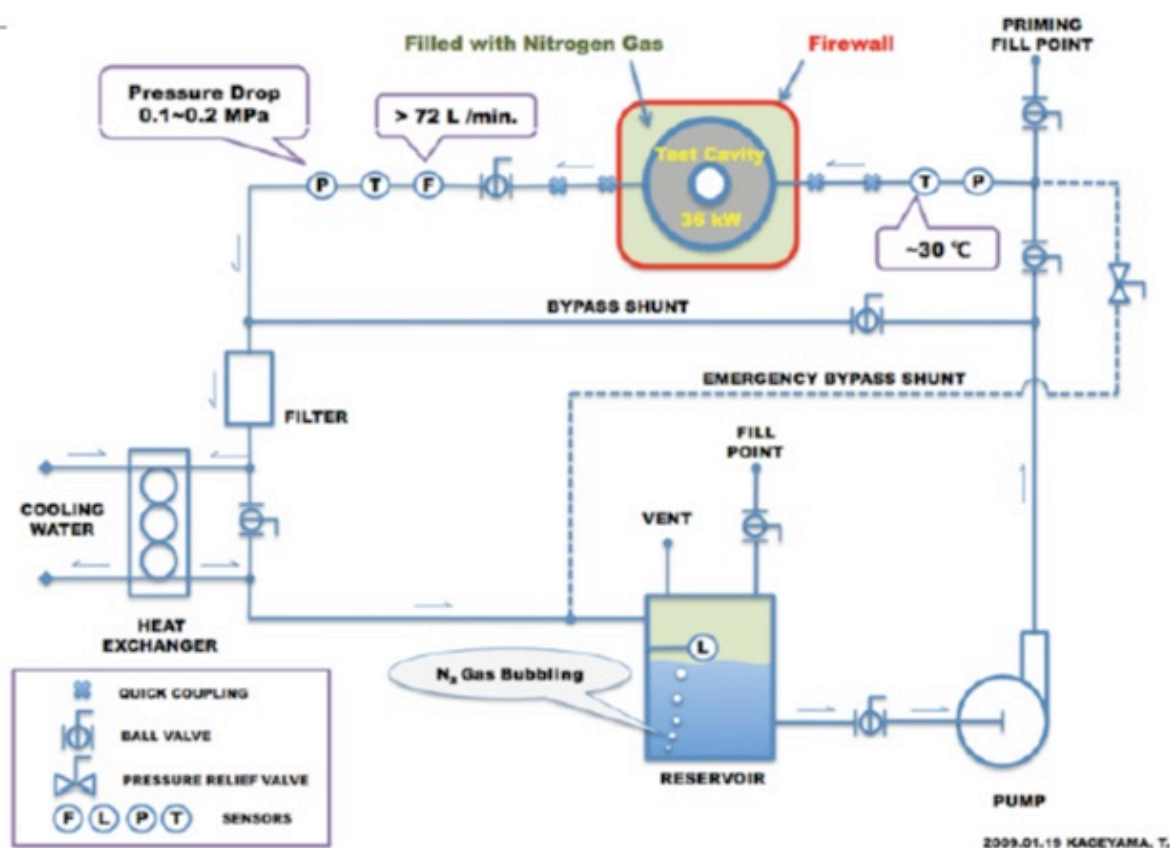


図 4.4: 冷却システムの概略図

図 4.4 に示した図は元々はノルマルパラフィン冷媒として使用する事を想定していたので、三菱重工に設計を依頼して作られたものである。そのため、この冷却システムは防爆構造になっている。また、冷媒をフロリナートに変えても使用する事に問題は無い。

4.2 3D 電磁場シミュレーション

4.2.1 シミュレーション手法の概要

電磁場シミュレーションにアンソフト社の HFSS を用いた。HFSS はマイクロ波デバイス設計において業界標準となっている高周波 3 次元電磁界解析ツールである。

磁性体コアの径方向の構造はファインメット箔帯と表面に塗布したシリカの絶縁層が交互に並んでいる。このマイクロ構造を正確に入れてシミュレーションを行うことは困難なのでマクロ媒質的に近似して扱う。マクロ的なコアの誘電率と透磁率は径方向には積層構造、周方向はファインメットの占積率が 75% として扱うことで求める^[3]。磁性体コアの比誘電率、透磁率は周方向と径方向に円筒対称の異方性を持っているが、HFSS で設定できる異方性は直交座標系のみである。そこで「疑似円筒座標系」という手法を用いる^[5]。まず、コアを周方向に対して微小角度ごとに扇型に分割する。今回はこの角度を 6° とした。そして、各扇型に局所直交座標系を配して(図 4.5)、その上で媒質の異方性を定義することにより、擬似的に円筒座標系の異方性を表している。磁性体コアの局所直交座標系での異方性は表 4.4 に示す。

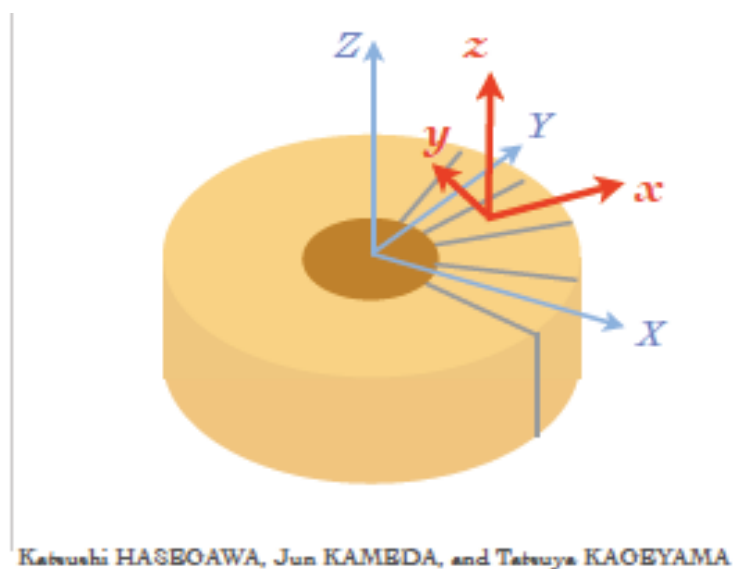


図 4.5: 局所直交座標系の設定の概念図^[1]

	X 軸方向	Y 軸方向	Z 軸方向
比誘電率	15	1	1
比透磁率	4	1800	1800

表 4.4: マクロ媒質的に近似した磁性体コアの異方性^[3]

	ノルマルパラフィン	FRP	アルミナ
比誘電率	2	7.8	100
比透磁率	1	1	1

表 4.5: 構成要素の比誘電率と比透磁率

シミュレーションを行うモデルは図 4.1 で示した構造を入れて行っている。ステンレスの部分の材質は完全導体に変更した。フロリナートとノルマルパラフィンでは比誘電率は殆ど変わらず、絶縁破壊電圧はフロリナートの方が高く、結果は殆ど変わらないので、ここでは冷媒をノルマルパラフィンとしてシミュレーションを行う。物性値は表 4.4、4.5 の値を使った。表 4.5 のアルミナの比誘電率は共振周波数が 1.7MHz になるように調節した値である (付録 D 参照)。アルミナの比誘電率の調整は実際には加速ギャップに並列にコンデンサをいれることに相当する。この比誘電率と加速ギャップの寸法ではキャパシタンス C は $C=2.28 \times 10^{-10}$ [F] になる。上記条件でシミュレーションを行い、得られた磁束密度分布を図 4.6 に示す。表示するデータは値が最大となる位相 (ピーク値) を使う。

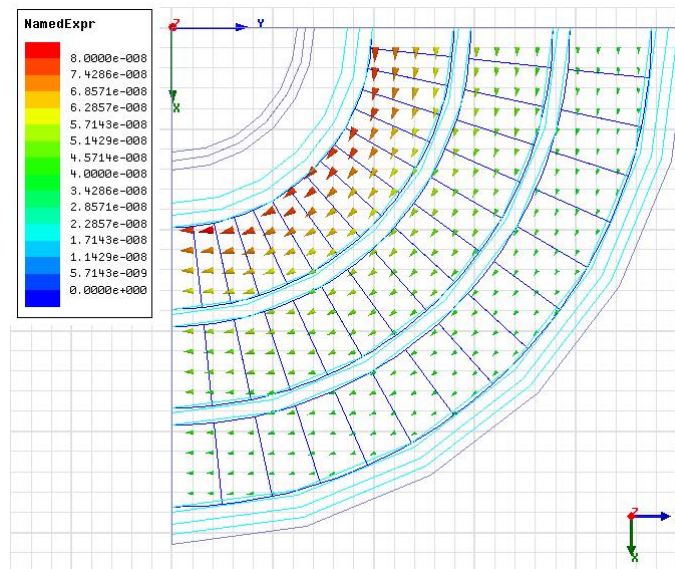


図 4.6: 磁束密度分布のベクトル図

HFSS の固有値モードは電力を指定して行うことができない。そのため、図 4.6 は規格化された磁束密度分布ではないので規格化を行う。規格化条件は加速電圧を用いる。我々の加速構造はギャップあたり 15kV の加速を要求しているので、ハーフセルではその半分の 7.5kV になる。そのため、加速電圧を 7.5kV で規格化し、このときに用いた定数を用いて他の磁束密度、電場を規格化する。規格化した加速勾配は図 4.7 に示す。

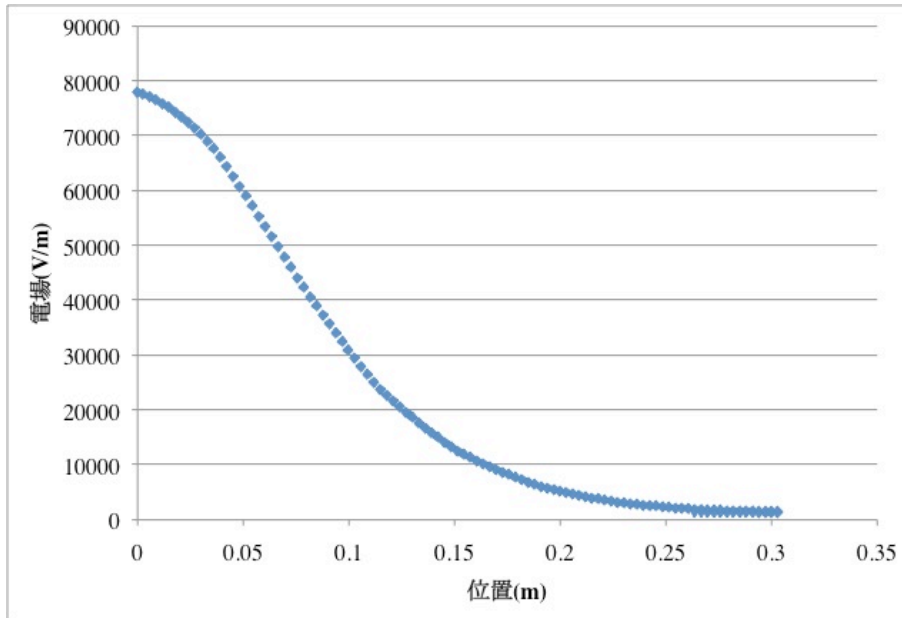


図 4.7: 規格化した加速勾配

4.2.2 磁性体コア内部の磁束密度

コアは図 4.1 に示すように三式入っている。ギャップに近いものをギャップ側、一番遠いものをショート板側と呼ぶ。規格化を行った三式のコア内部の磁束密度を図 4.8 に示す。

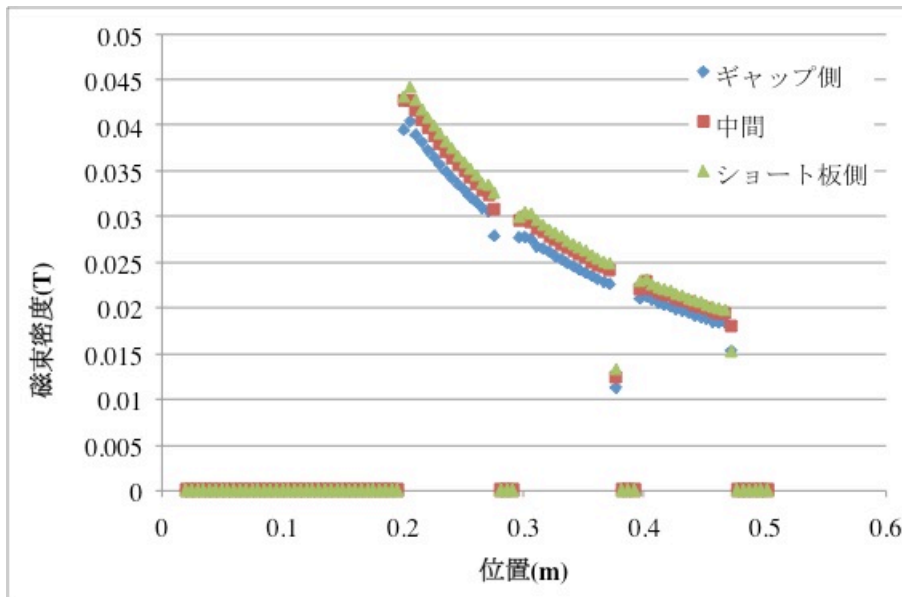


図 4.8: 規格化した磁束密度

各コアの磁束密度分布は $1/r$ に比例している。

コアの発熱は磁束密度の二乗に比例するため、図 4.8 の分布から発熱分布を作ることができる。磁束密度から三式のコアはほぼ同じ発熱分布になることがわかる。

4.2.3 磁性体コア表面の電場

三式のコア表面に生じる電場を図 4.10 に示す。生じる電場はギャップ側が強いので図 4.10 に示す電場の経路は図 4.9 に示す。図中の青線 (①) はギャップ側、赤線 (②) は中間、緑線 (③) はショート板側のコア一式の経路である。

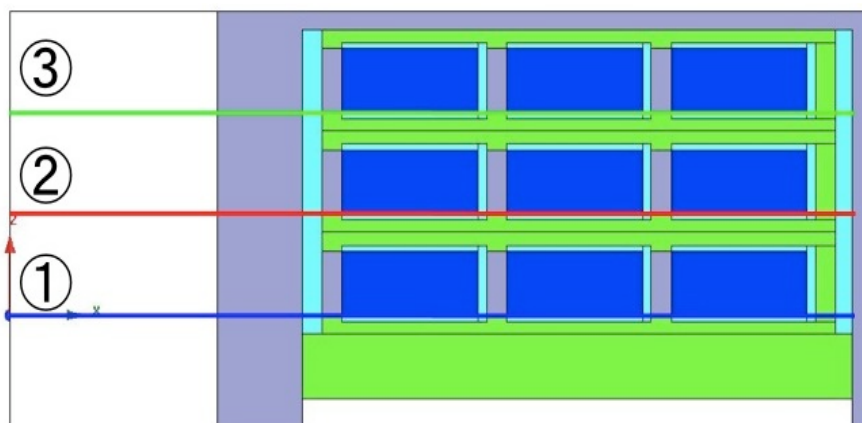


図 4.9: 図 4.10 に示す電場の経路

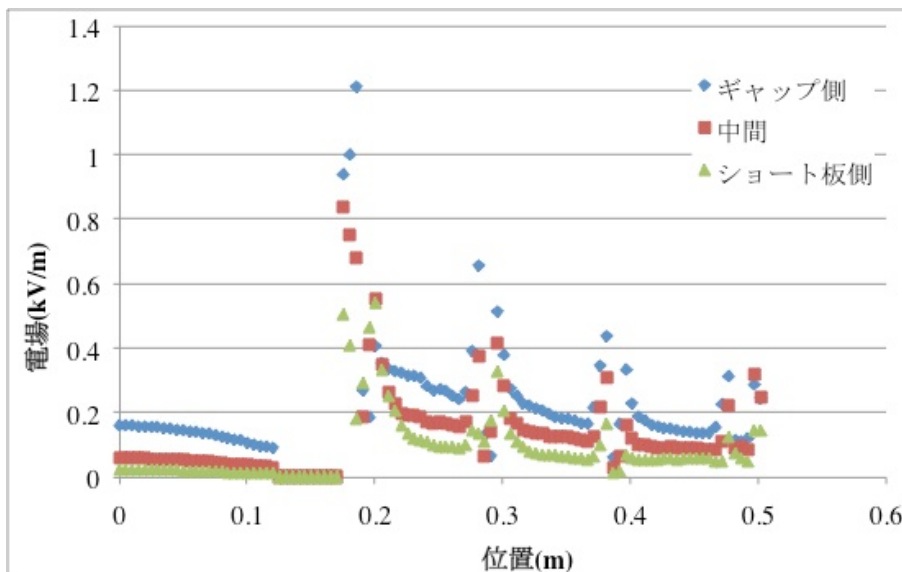


図 4.10: 規格化したコア表面の電場

ギャップ側の電場が最も強いのでこれについて述べる。

電場の分布は鋭いスパイクとスパイクの間の谷と直線の3つの部分がある。スパイクはノルマルパラフィン、谷はFRP、直線はコアの部分の電場である。媒質ごとの最も強い電場と絶縁破壊電圧は表4.6にまとめる。実際のコアはファインメットとシリカが層状に入っているため電荷がファインメットに溜まり、電圧がシリカの部分にかかるため、コアの部分の電場に(ファインメット箔帯一層の厚み(18 μ m)+(シリカー層の厚み+空間)(6 μ m)) \div ((シリカー層の厚み+空間)(6 μ m))の値をかけて補正として電場を4倍にする。この部分の絶縁破壊電圧はファインメット箔帯の表面に塗布したシリカの値を用いる。なお、表4.6の絶縁破壊電圧の値は直流電圧に対する値である。

	シリカ	ノルマルパラフィン	FRP
電場 (kV/cm)	1.6	1.2	0.066
絶縁破壊電圧 (kV/cm)	10000 ^[22]	120 ^[2]	220

表 4.6: コア表面の電場 (ピーク値) と絶縁破壊電圧

シミュレーションで求めた各媒質の最大電界強度 (ピーク値) は絶縁破壊電圧に比べて十分余裕をもって低いことが理解できる。

4.3 3D 流体シミュレーション

4.3.1 3D 流体シミュレーション概要

アンシス・ジャパン株式会社の ANSYS CFX を用いてコア一式の冷却を行う冷媒の流れのシミュレーションを行った。流路のモデルは図 4.11 に示す。

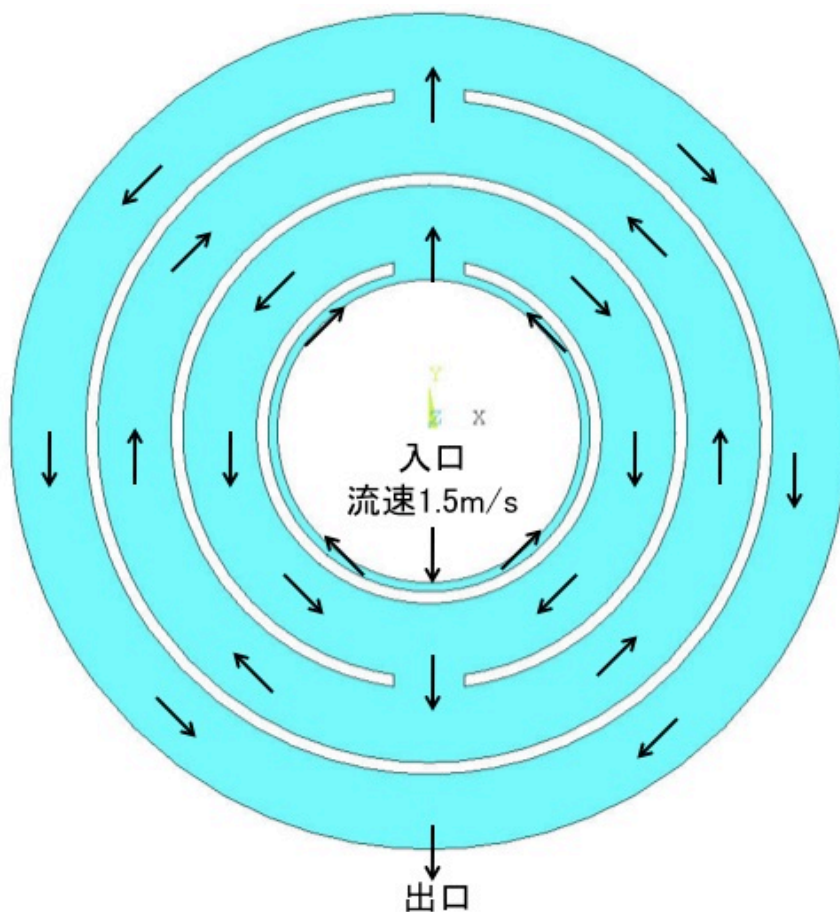
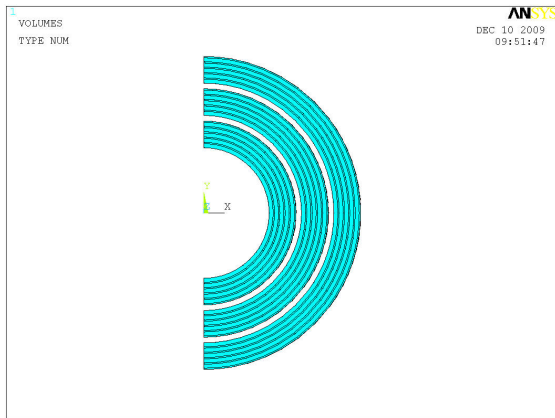


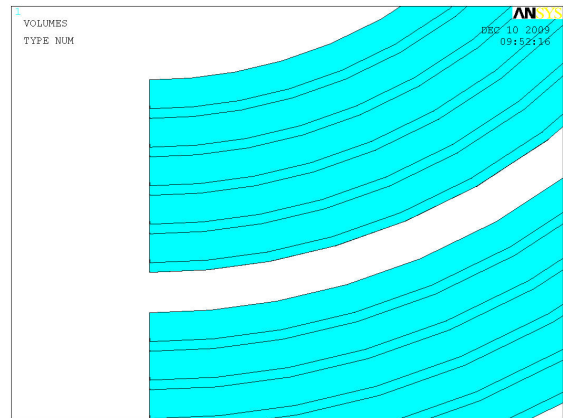
図 4.11: 流路の形状

流路のモデルはコア一式と FRP 板の間にできる空間とバッファの部分のみを取り出して作った。この図ではすのこは流れに影響を与えないと考えて考慮していない。図 4.11 より、冷媒の流れは左右対称になるので半分を取り出し、対称面に対称条件を指定してシミュレーションを行う。

CFX では物性値に異方向性が扱えないので、ファインメットの層とフロリナートの層を作り、交互に重なるようにしてコア一式のモデルを作る。コア一式のモデルはコア一式を構成する各コアを 10 層に分けることにした。各コアの層の分け方は占積率 75% を考慮して、隣り合う層の幅が 3:1 の比になるようにした。コア一式のモデルは図 4.12 に示す。



(a) コア一式の配置



(b)(a) の一部拡大図

図 4.12: CFX で使ったコアのモデル

図 4.12 の幅が広い層はファインメットの層、狭い層はフロリナートの層になる。フロリナートの層は実際には殆ど流れができなため、シミュレーションでは液体ではなく固体として扱う。流路のモデルとコア一式のモデルは図 4.13 に示す。

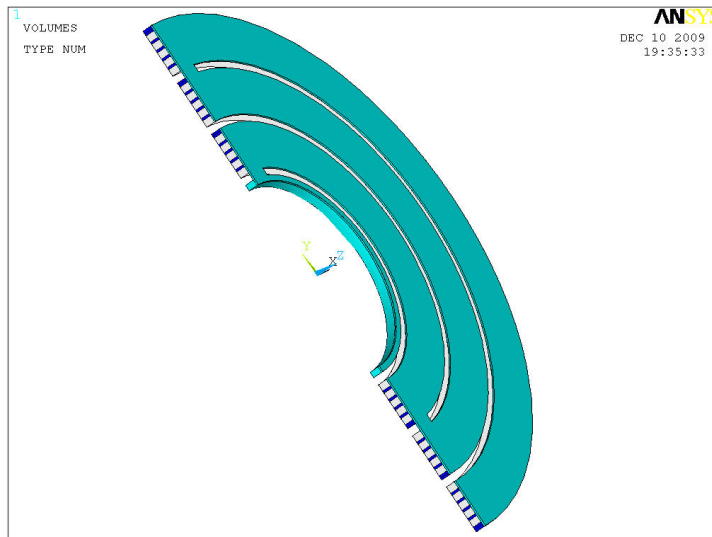


図 4.13: 流路とコア一式の形状

入口の面積は図 4.11 の半分になるので、 $0.04\text{m} \times 0.003\text{m} = 1.2 \times 10^{-4}\text{m}^2$ になる。冷媒はこの面に垂直に流速 1.5m/s で流れ込むとしたので、コア一式あたりの設定した流量は約 44L/min になる。

コア一式の発熱分布は図 4.8 の値をもとにしてコア一式あたりの発熱量が 6kW になるようにして作った。その値は図 4.14 に示す。コア一式の発熱分布はファインメットの層のみ指定するので、図 4.14 の層の番号は小さいものほど内径側に有るファインメットの層を

指す。また、ファインメットとフロリナートの物性値は表 4.7 に示す。この条件での冷媒の 3D 流体シミュレーションは図 4.15 になる。

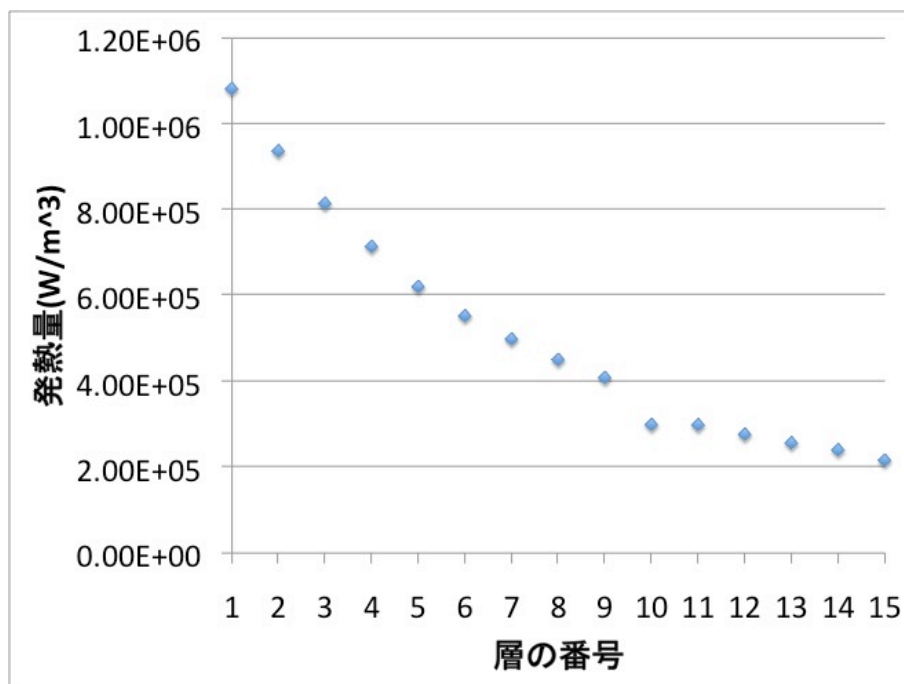


図 4.14: コア一式の発熱分布

	ファインメット	フロリナート (30 °C)
密度 [kg/m ³]	5500	1804
動粘度 [m ² /s]	-	0.69×10 ⁻⁶
比熱 [J/kg/K]	500	1061
熱伝導度 [W/m/K]	7.1	0.063
沸点 [°C]	-	128

表 4.7: ファインメットとフロリナートの物性値

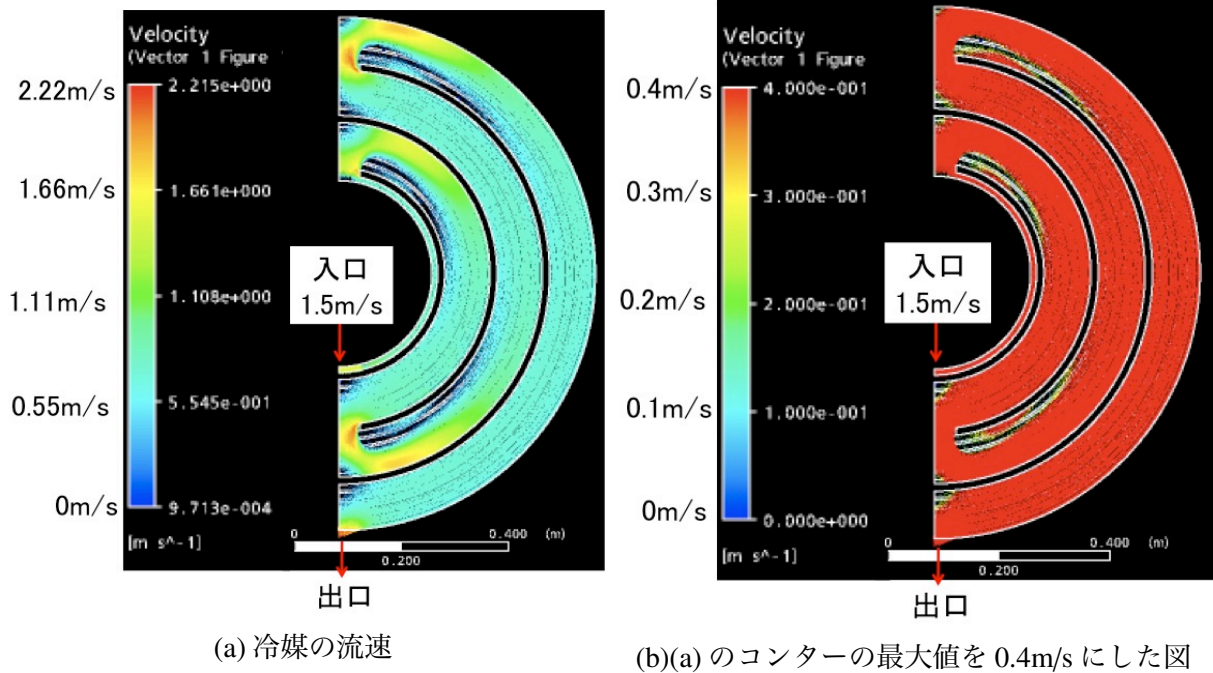


図 4.15: 流路の流体シミュレーション

フロリナートの一般的な物性値と流路の形状では 0.33m/s が臨界流速になるため、図 4.15 の (b) のコンターの最大値は 0.4m/s とした。

図 4.15 より、各コアの上流部の内側に大きな澱み、下流部に小さい澱みが見えている。

次にこの条件下でのコアの温度分布を示す。温度を示す面はコア一式の厚み方向の中心部分(図 4.16 参照)とする。この結果は図 4.17 に示す。

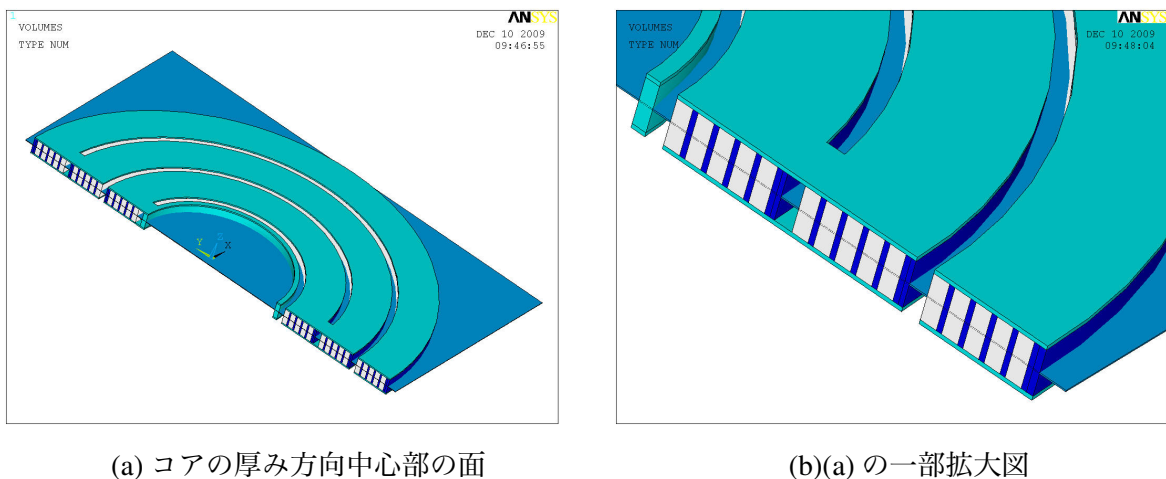


図 4.16: 温度を表示する面

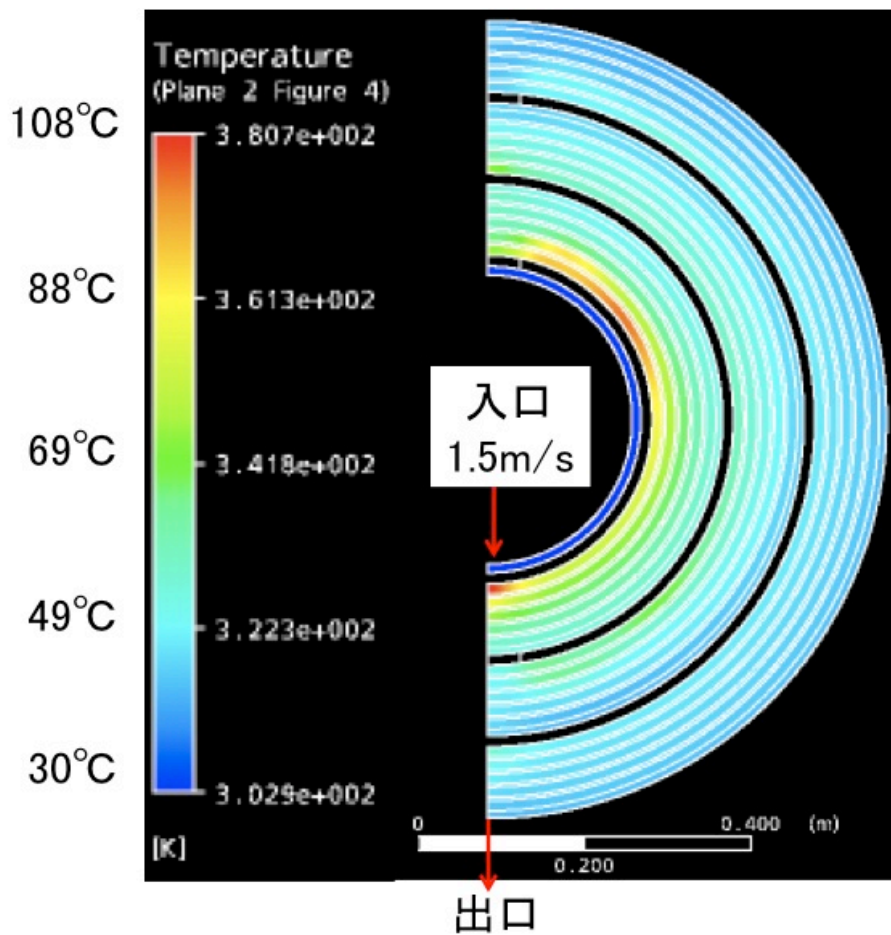


図 4.17: コア一式の温度分布

図 4.17 より、小コアの上流部の澱みと下流部の澱みの部分が他の部分と比べて高い温度になっている。この冷却効率が悪くなっている部分の澱みを解消するように次の節では流路の改善を行い、その結果を示す。

4.3.2 改善した流路を使った3D流体シミュレーション

コア一式の冷却効率を上げるために冷媒の流れの改善を行う。図4.15において澱みが生じている部分、特に小コアについて冷媒の流れを改善するために次の三点の改善を行う。

1. バッファーから小コアに流れ込む部分に小さな吹き出し口をつける
2. 流れが回り込む部分の角を丸くして内側に流れ込みやすくする
3. コア一式の形状を保持するすのこの柱に角度をつけて流れを作る

1、2の改善策により、小コアの上流部の形状は図4.18になる。すのこの形状は図4.19に示す。この図では柱に角度をつけていないが、角度をつけることで冷媒の流れに影響を及ぼし、澱んでいる部分に流れを作るようにする。

これらの改善策を施した結果は図4.20に示す。

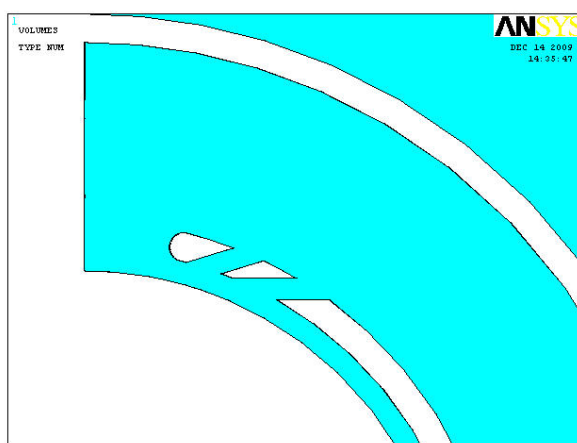
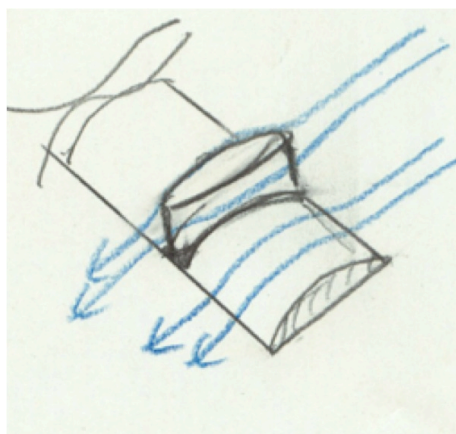
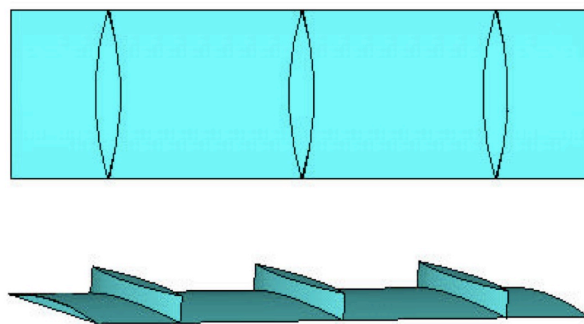


図 4.18: 小コアの上流部の拡大図

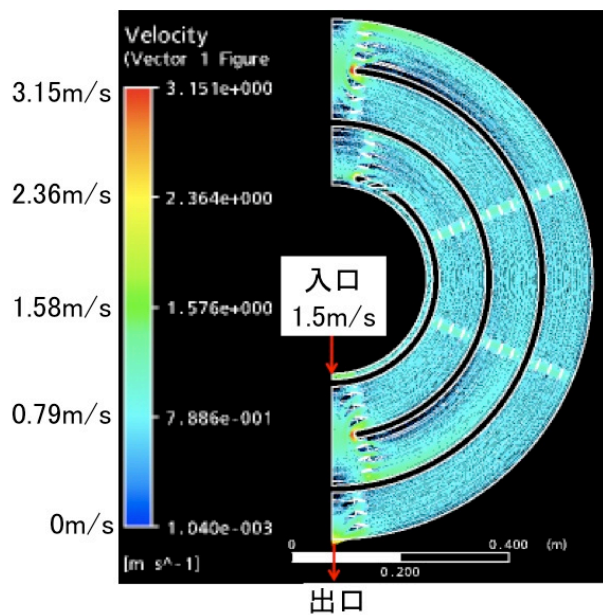


(a) 製作予定のすのこの概観

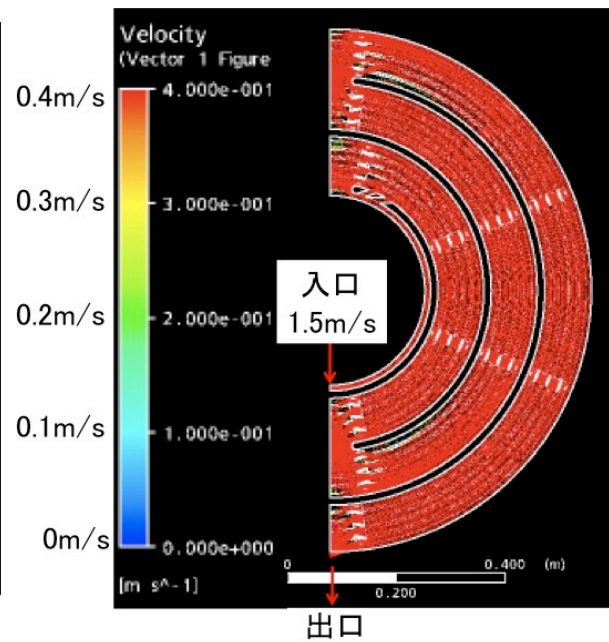


(b) シミュレーションで用いるすのこ

図 4.19: すのこの形状



(a) 改善策を施した流路の流速



(b)(a) のコンターの最大値を 0.4m/s にした図

図 4.20: 改善策を施した流路の流速

図 4.20 から改善策を施したことで図 4.15 では生じていた小コアの澱みは解消されたことが理解できる。また、中コア、大コアの澱みも軽減されている。このときのコア一式の厚み方向中心部の温度分布は図 4.21 になる。

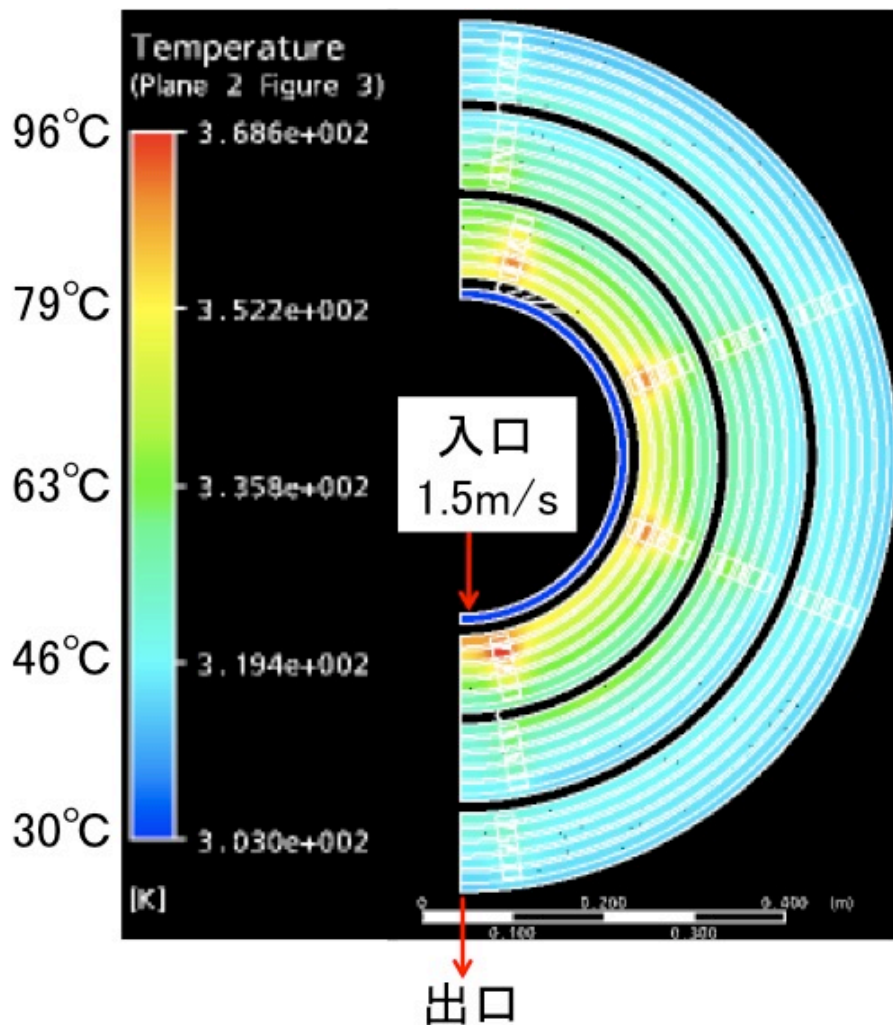


図 4.21: 改善策を施したコア一式の温度分布

図 4.17 と比べて、図 4.21 の最大温度は 10°C 程度減少できた。しかし、すのこが置いてある部分は周りと比べて高い温度になってしまっている。これはすのこの部分の伝熱は考慮していないこととすのこがコア表面に密着していると仮定してシミュレーションを行ったためである。実際にはすのこは FRP で作るので多少の伝熱はある。また、すのこは各コアを形成するファインメットの箔帯が垂れることを防げば良いので、柱の高さを流路の高さと同じ 3mm ではなく、2.8mm にすることで少なくともコアの片面には流れができるため、実際にはこの部分の温度はシミュレーションの結果よりも低くなるのが期待できる。次にフロリナートの温度上昇について調査する。流路全域のフロリナートの温度は図 4.22 に示す。

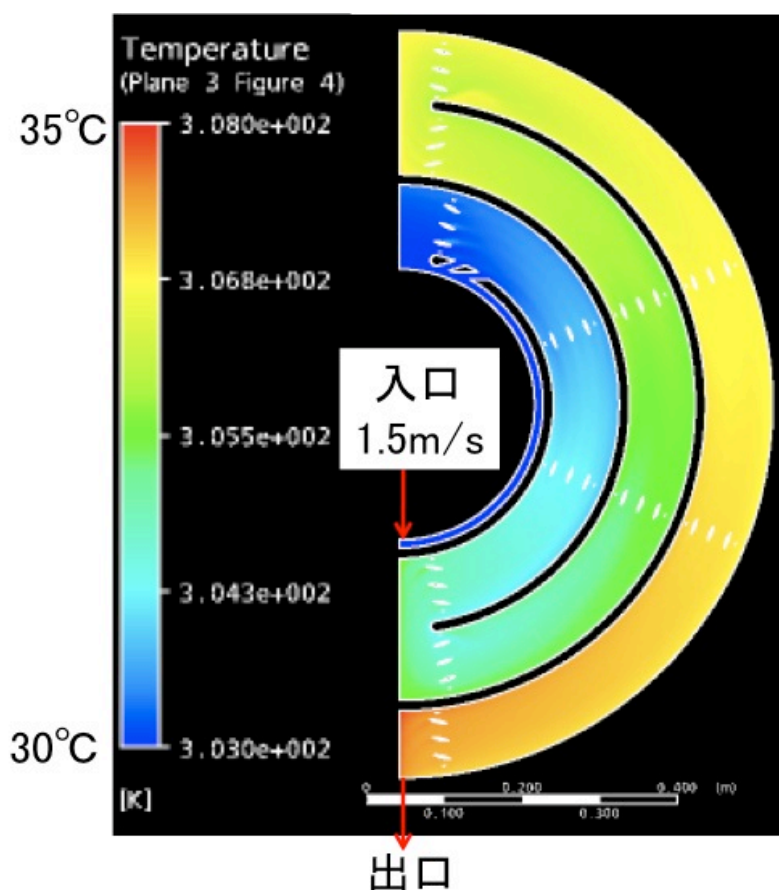


図 4.22: フロリナートの温度分布

図 4.22 より冷媒の温度は約 4.5℃上昇していることが確認できる。

次に冷媒が高価であるため、冷却システム一つに対していくつまで熱負荷を直列に接続しても十分に冷却することが可能であるか評価を行う。評価の方法は冷媒の温度を変えてシミュレーションを行い、コア式の温度分布と冷媒の温度分布を確認する。フロリナートの温度は 40℃と 50℃とし、各温度の物性値等は表 4.8 に示す。

	30℃	40℃	50℃
密度 [kg/m ³]	1804	1780	1755
動粘度 [m ² /s]	0.69×10 ⁻⁶	0.59×10 ⁻⁶	0.51×10 ⁻⁶
比熱 [J/kg/K]	1061	1076	1092
熱伝導度 [W/m/K]	0.063	0.0624	0.0619
臨界流速 [m/s]	0.28	0.24	0.2
熱伝達係数 (流速 0.6m/s)[w/m ² /K]	625	669	712

表 4.8: 1 気圧での各温度のフロリナート (住友 3M FC-3283) の物性値と臨界流速

- 40°Cのフロリナートの結果

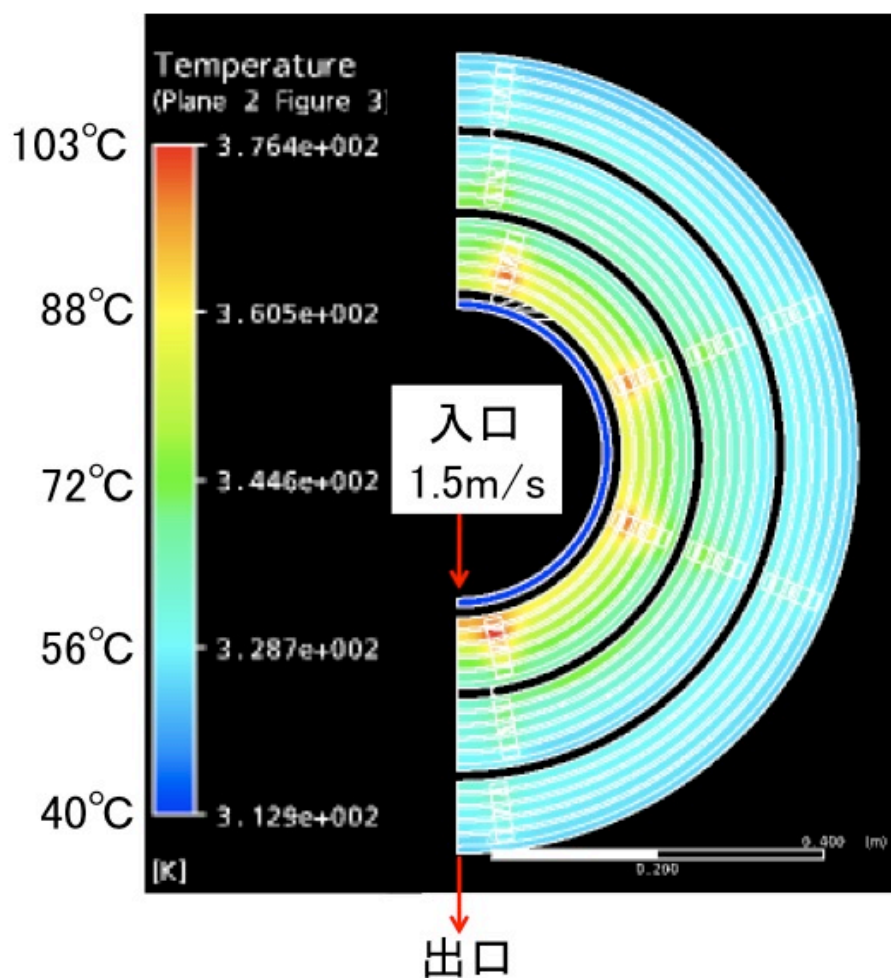


図 4.23: 40°Cのフロリナートを用いた冷却時のコア一式の温度分布

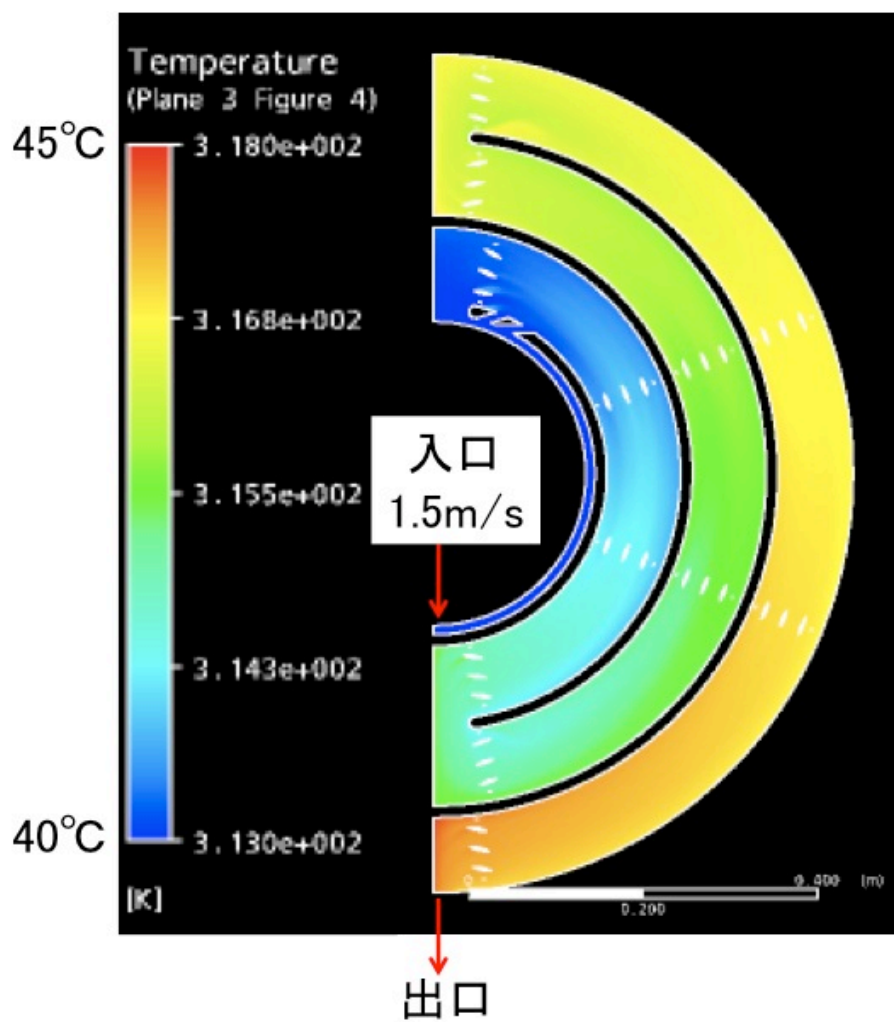


図 4.24: 40 °C のフロリナートの温度分布

- 50°Cのフロリナートの結果

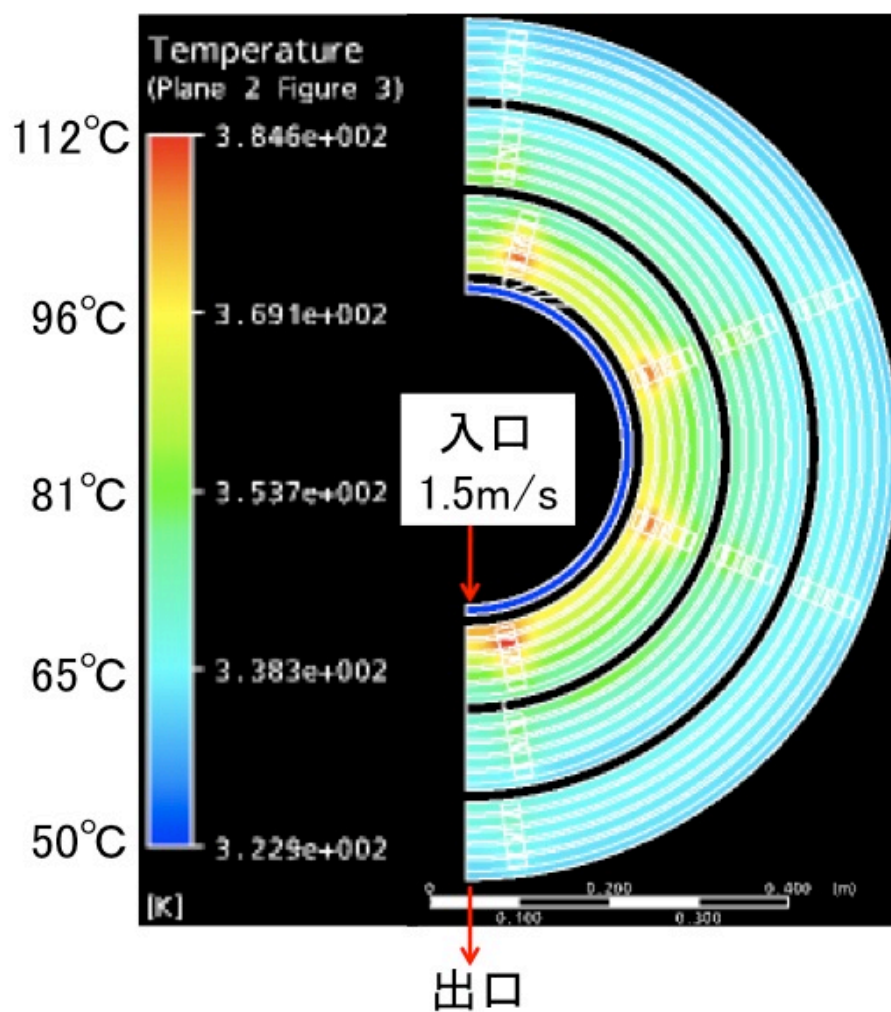


図 4.25: 50°Cのフロリナートを用いた冷却時のコア一式の温度分布

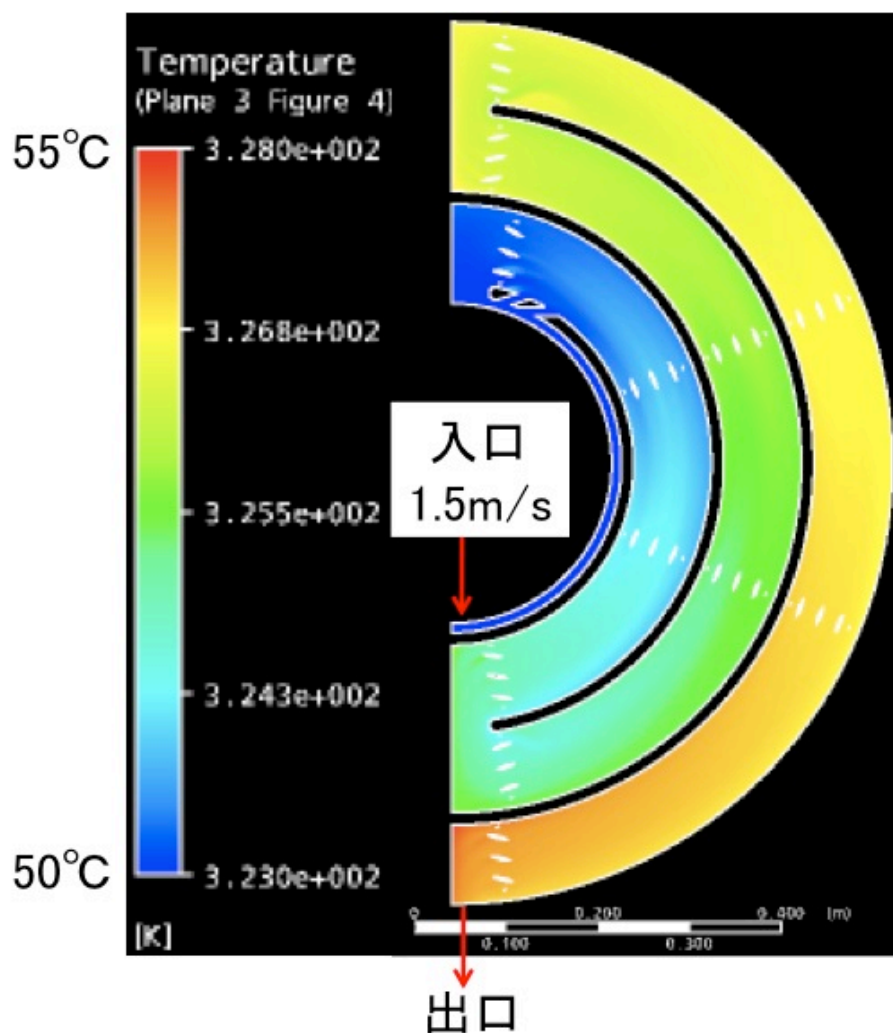
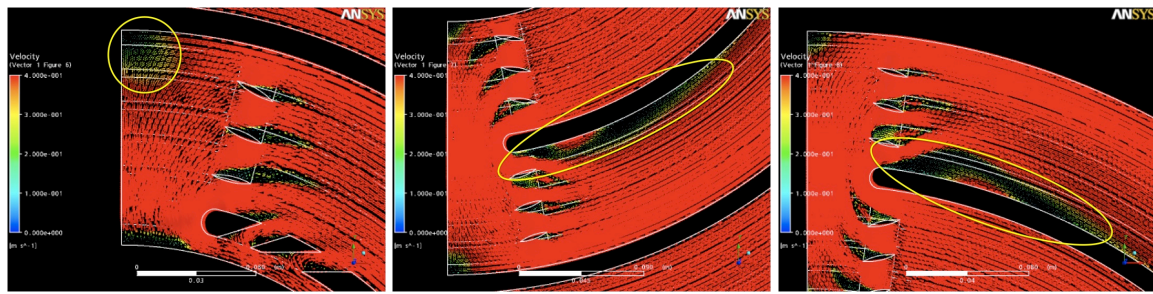


図 4.26: 50°Cのフロリナートの温度分布

コア一式の最高温度はフロリナートの沸点 (1 気圧では 128°C) を超えないことが要求されるが、フロリナートの温度を 30°C~50°Cとしたときの結果ではどれも超える事はなかった。冷媒の温度はどの条件でも約 4.5°C上昇したが、これはコア一式の発熱量 (6kW) と冷媒の密度、体積、比熱から計算した結果と一致する。以上のことを踏まえると冷媒をフロリナートにすると入り口での冷媒の温度は 50°C程度までなら問題なく使えることが理解できる。ハーフセルのタンク一つで冷媒は約 4.5°Cの温度上昇し、一つ目の負荷に流れ込む冷媒の温度は 30°Cである事を考慮するとハーフセルのタンク五つ程度まで負荷を直列につなぐことが可能である。

最後に改善策を施した流路でもまだ澱んでいる部分があるため、この形状の澱み部分を図 4.27 に示す。



(a) 小コアの澱み部分

(b) 中コアの澱み部分

(c) 大コアの澱み部分

図 4.27: 各コアの澱み部分

これらの部分は現在想定している発熱量と発熱分布では問題はなかったが、加速電圧をさらに高くすることを考えると将来的にこの部分の澱みも解消する必要があるが出てくる。図 4.27 の (b) と (c) については小コアの内径側と同様に、吹き出し口をつけることで改善されると考えられるがかわりに (a) と同様の澱みができることも考えられる。

第5章 まとめと課題

5.1 RCS コアのシャントインピーダンスの低下の原因

RCS で使用されている磁性体コアの熱応力をマクロ媒質モデルとマイクロ構造モデルの二つのモデルでシミュレーションを行い、見積もった。行ったシミュレーションから、マクロ媒質モデルでは 83MPa、マイクロ構造モデルでは 180MPa の熱応力がファインメット箔帯にかかっているという結果が得られた。

この結果に対して、圧縮試験からサンプルが座屈を起こす応力は最小 16MPa という結果になった。以上の結果から磁性体コアの座屈応力以上の熱応力が内部に発生してしまっているため、座屈を起こすと考えることができる。このことから熱応力が座屈の原因であることを強く示唆する。得られた結果より、座屈の発生を抑制するために、安全ファクターを考慮して、熱応力の周方向成分を 10MPa 以下に抑える必要がある。

シミュレーションからこの条件を満たすことが可能であると考えられるモデルはエポキシ樹脂による含浸を行わないモデルのみであった。この結果は RCS で使われている磁性体コアの内、Type1 のコアについては今のところ座屈を起こしているコアが確認されていないことと一致している。

また、Type2 のコアについては、防錆コーティングが剥がれているが、座屈が今のところ発生していない理由はレコード面にシリカを塗布することでファインメットの層間に十分エポキシが入らないため、層と層の間に空気が残ってしまっているためだと考えられる。その結果として熱応力が緩和されて座屈が起こっていないと思われる。

以上のことから座屈の発生を抑制する為に熱応力の観点から低粘度エポキシ樹脂含浸を行わないコアが有利であることが理解できる。

5.2 フロリナート式金属磁性体コア装荷加速構造

5.2.1 電磁場シミュレーションまとめ

現在、開発を進めている加速構造の三次元電磁場シミュレーションを HFSS を用いて行い、内部に生じる電場、磁場を評価した。HFSS では電力の指定ができないので、内部に生じる電場、磁束密度の規格化は加速電圧をハーフセルのギャップあたり 7.5kV に規格化することで行った。

シミュレーションの結果、タンク内部に生じる電場は十分小さく、放電が起こらないことが理解できる。電場の評価方法は、最も強い電場が生じるギャップ側のコア表面に生じた電場と加速構造を構成する構成要素の絶縁破壊電圧を比較して評価を行った。磁束密度については三式のコアで同じ磁束密度分布になることが理解できる。この磁束密度分布よ

り一式のコアの発熱分布が得られ、発熱分布は三次元流体シミュレーションのコアの発熱分布に利用した。

5.2.2 流体シミュレーションまとめ

開発を進めている加速構造の3D流体シミュレーションを行い、冷媒の流速とコア一式の温度について調査を行った。すのこを考慮しない元々の形状の流路では各コアの内径側に澱みができる結果となった。この状態のコア一式の温度分布は澱んでいる部分、特に小コアの澱み部分では100℃を超える部分が発生した。これらから冷却効率を改善するためにはこの澱みを解消する必要があることが理解できる。

澱みを解消するために次の三つの改善を行った。

1. バッファーから小コアに流れ込む部分に小さな吹き出し口をつける
2. 流れが回り込む部分の角を丸くして内側に流れ込みやすくする
3. コア一式の形状を保持するすのこの柱に角度をつけて流れを作る

その結果、小コアの澱みは解消し、中コア、大コアの澱みも少し小さくすることに成功した。コア一式の温度についても最大温度を10℃程度下げることが成功した。

しかし、新たに小コアの上流部外径側に澱みができてしまった。現在想定している発熱量ではこの部分の澱みと、中コア、大コアの澱みは問題にならないが、加速構造のハイパワー化を考慮するとこの部分の澱みも将来的には完全に解決する必要がある。

また、冷媒にフロリナートを使用するため、冷媒のコストを考えて冷却システム一つに対してをいくつまで負荷を直列につなぐことが可能であるか調査を行った。調査方法は冷媒の温度を30℃以外に40℃、50℃とした流体シミュレーションを行い、冷媒の温度上昇と磁性体コアの最大温度について調査した。結果、コア一式の温度はどの温度でもフロリナートの沸点を超える温度(1気圧で128℃)にならず、冷媒の温度上昇からハーフセルのタンク五つ程度までならば冷却システムを直列につなげることが可能であることが理解できる。

5.2.3 将来計画

現在、設計、開発を行った加速構造の試作機の製作が行われている。試作機ではコア一式は三段積みではなく、一段のみとしたハーフセルの構造である。この構造は図5.1示す。

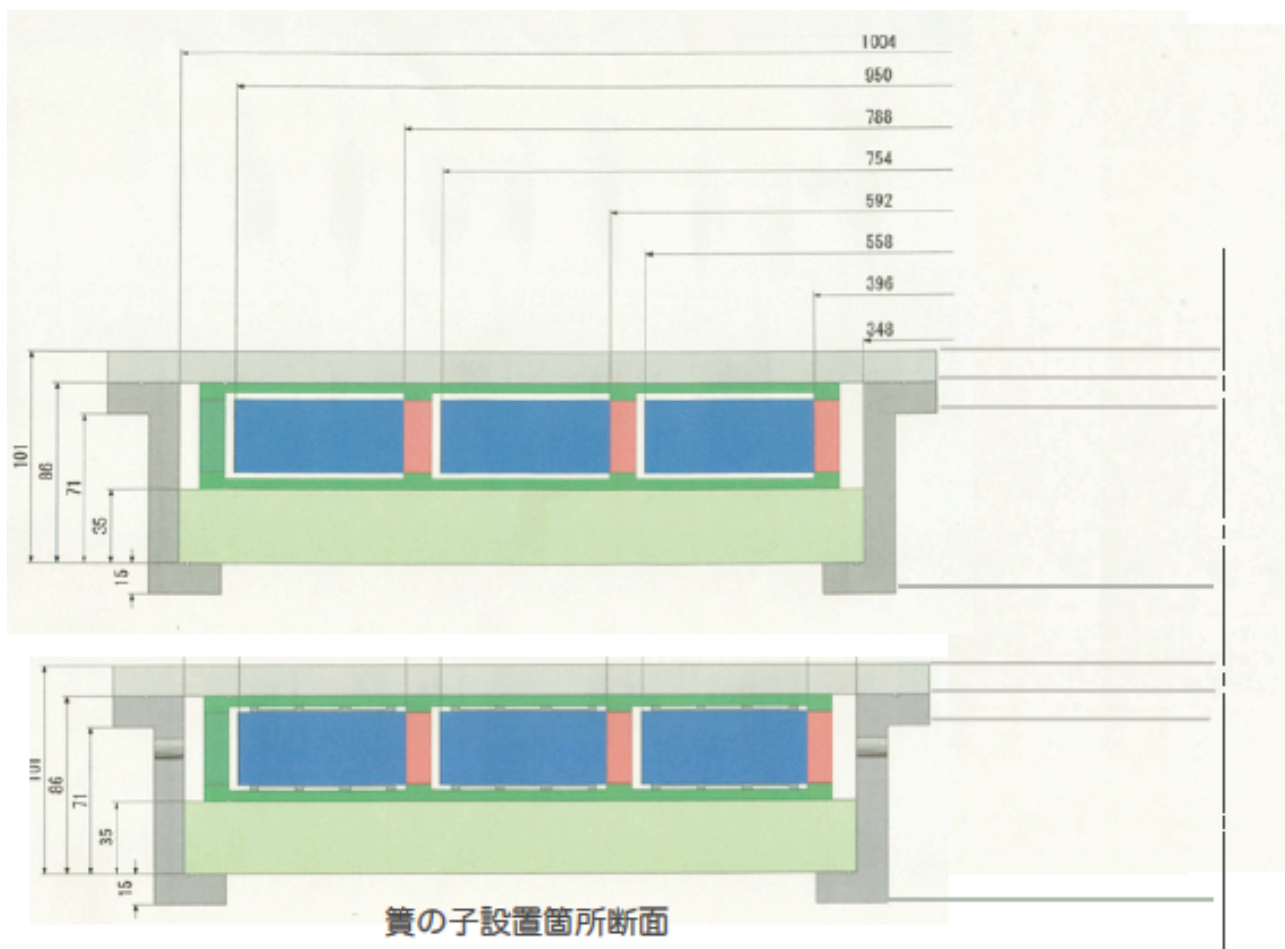


図 5.1: 試作機の加速構造

この試作機は予定では三月から四月に完成する。この試作機を使ってフロリナート式金属磁性体コア装荷加速構造の実証試験を行うことが予定されている。

付録A 加速空洞の一般論

ここでは磁性体コアを装荷した加速空洞の一般論について説明を行う。コアを構成する磁性体はヒステリシスや渦電流によるロスがある。そのため、透磁率を実成分と虚成分に分けて考えると式 A.1 に示す形式になる。

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (\text{A.1})$$

式 A.1 の実成分の増加はインダクタンスの増加を意味し、虚成分の増加はロスの増加を意味する。インピーダンスは真空コアのインダクタンスを L_0 とすると以下のようにになる。

$$\begin{aligned} Z &= j\omega\mu L_0 \\ &= j\omega L_0(\mu' - j\mu'') \\ &= j\omega\mu' L_0 + \omega\mu'' L_0 \\ &= j\omega L + r \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

ここで、 L と r は以下の式である。

$$L = \mu' L_0 \quad (\text{A.3})$$

$$r = \omega\mu'' L_0 \quad (\text{A.4})$$

次に図 A.1 のようにロスのあるコアに平行にコンデンサが入った回路を考える。

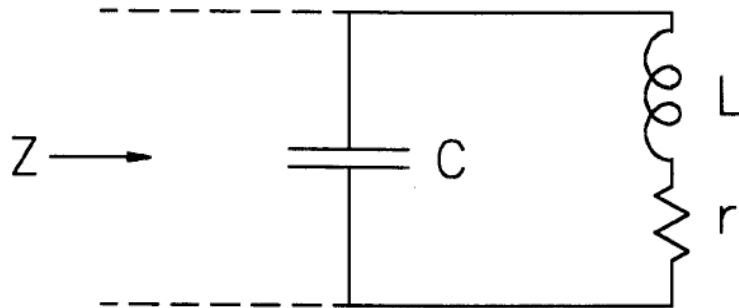


図 A.1: 計算に用いた共振回路^[16]

図 A.1 のインピーダンス Z は以下の式になる。

$$Z = \frac{v}{i_0} = \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{j\omega L + r}} \quad (\text{A.5})$$

式 A.5 の分母を変形すると

$$\frac{1}{\frac{\omega^2 L^2}{r} \left(1 + \frac{r^2}{\omega^2 L^2}\right)} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L \left(1 + \frac{r^2}{\omega^2 L^2}\right)}\right) \quad (\text{A.6})$$

となり、共振点でのインピーダンス Z が実数になることから次の条件を満たす。

$$\omega_0^2 C L \left(1 + \frac{r^2}{\omega_0^2 L^2}\right) = 1 \quad (\text{A.7})$$

式 A.7 から導かれる共振周波数 f は次の式になる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{L^2}} \quad (\text{A.8})$$

このときのインピーダンス Z は式 A.7 から

$$Z = \frac{\omega_0^2 L^2}{r} \left(1 + \frac{r^2}{\omega_0^2 L^2}\right) \quad (\text{A.9})$$

$$= \frac{L}{Cr} \quad (\text{A.10})$$

になる。この式からコンデンサにかかる電圧 v は式 A.5、A.10 より

$$v = \frac{L}{Cr} i_0 \quad (\text{A.11})$$

となり、コンデンサに蓄積されるエネルギー U は

$$U = \frac{1}{2} \frac{L^2}{Cr^2} i_0^2 \quad (\text{A.12})$$

となる。このときのシャントインピーダンス R は

$$R = \frac{\omega_0^2 L^2}{r} \left(1 + \frac{r^2}{\omega_0^2 L^2}\right) = r + \frac{\omega_0^2 L^2}{r} \quad (\text{A.13})$$

となる。シャントインピーダンス R に流れる電流 i_R は

$$i_R = i_0 \quad (\text{A.14})$$

となるので損失は

$$\frac{1}{2} R i_0^2 = \frac{1}{2} \frac{L}{Cr} i_0^2 \quad (\text{A.15})$$

となる。

加速空洞の性能を表すパラメーターの一つに Q 値と呼ばれるパラメーターがある。これは空洞に溜められたマイクロ波のエネルギーとエネルギー損失から定義され、この場合の Q 値は式は以下の式になる。

$$Q = \frac{\omega_0 U}{\frac{1}{2} R i_0^2} = \frac{\omega_0 L}{r} \quad (\text{A.16})$$

Q 値を用いてシャントインピーダンス R を表すと以下の式になる。

$$\begin{aligned} R &= \omega_0 Q L \left(1 + \frac{r^2}{\omega_0^2 L^2} \right) \\ &= \omega_0 Q L \left(1 + \frac{1}{Q^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

Q 値が十分大きいとき、式 A.17 は

$$\begin{aligned} R &= \omega_0 Q L \\ &= (\mu' Q f) 2\pi L_0 \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

となる。

ここまでは等価回路を使い、加速の性能を表すパラメーターである Q 値、シャントインピーダンス、 $\mu' Q f$ を導出したが、一般的にこれらは次のように定義される。

- Q 値

理想的な空洞共振器 (完全導体で密閉されている) の場合、空洞内に入射したマイクロ波は減衰することなくいつまでも振動を続ける。実際の空洞共振器ではエネルギー損失があるため、マイクロ波は時間とともに減衰する。そこで、空洞内のマイクロ波のエネルギーに対するエネルギー損失の割合を示す量として Q 値が定義される。

$$Q = \frac{\omega_0 W}{P} \quad (\text{A.19})$$

ここで ω_0 は共振角周波数、 W は空洞内に蓄えられたマイクロ波のエネルギーの時間平均、 P は単位時間あたりのエネルギー損失である。この値が大きいほどエネルギー損失の割合は小さくなる。

- シャントインピーダンス

シャントインピーダンス R は空洞の加速効率を示す指標として使われている。空洞の加速電圧 v の二乗と単位時間あたりのエネルギー損失 P より定義される。

$$R = \frac{v^2}{P} \quad (\text{A.20})$$

この値が大きいほど空洞の加速効率は良くなる。

- $\mu' Q f$ 積

$\mu' Q f$ は空洞の加速効率を示すパラメーターで、式 A.18 より定義される。これはシャントインピーダンスに比例するのでこの値が大きいほど加速効率は良くなる。

付録B 熱伝達係数の計算式

熱伝達係数は、対流熱伝達、沸騰熱伝達、凝縮熱伝達など、流体と物体間の熱移動を扱うための係数である。熱伝達係数は様々な場合について実験的、または理論的な式が導出されている。熱伝達係数を対流による熱伝達と静止している流体の熱伝導の比率を示すヌセルト数 Nu を用いて表すと以下の式になる。

$$h = \frac{kNu}{d} \quad (\text{B.1})$$

この式の各係数は以下の通りである。

h : 熱伝達係数 [W/m²/K]

Nu : ヌセルト数

k : 熱伝導度 [W/m/K]

d : 特性長さ [m]

ここでは図 B.1 の場合について考える。

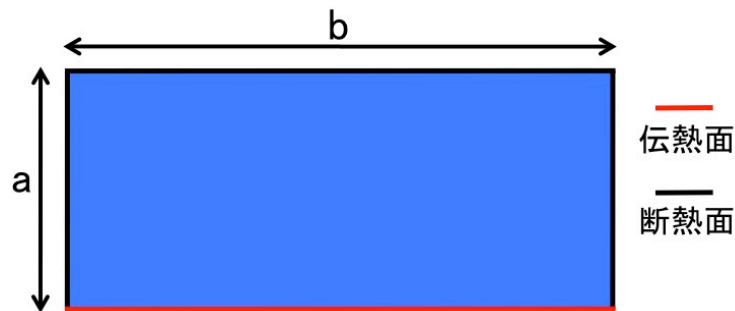


図 B.1: 流路の断面

特性長さ d は図 B.1 の等価直径になる。等価直径の定義は以下の式になる。

$$d = 4 \frac{S}{L} \quad (\text{B.2})$$

ここで S は図 B.1 の面積、 L はぬれぶち長さなので d は次の式になる。

$$d = 4 \frac{ab}{2(a+b)} = 2 \frac{ab}{(a+b)} \quad (\text{B.3})$$

ヌセルト数は層流と乱流で異なり、一般的に乱流の場合はレイノルズ数 Re とプラントル数 Pr で表すことができる。レイノルズ数は慣性力と粘性力の比で表される流れの状態を表

す無次元量である。レイノルズ数が臨界レイノルズ数よりも低い領域の流れは層流になり、高い領域は乱流になる。一般的に臨界レイノルズ数は 2300 程度である。レイノルズ数は以下の式で求められる。

$$Re = \frac{Ud}{\mu/\rho} = \frac{Ud}{\nu} \quad (\text{B.4})$$

ここで式 B.4 の各係数は以下の通りである。U:特性速度 [m/s]

μ :粘度 [Pa · s]

ρ :密度 [kg/m³]

ν :動粘度 [m²/s]

次はプラントル数を求める。プラントル数は動粘度と温度拡散率の比で表される。一般的に数値流体解析では流れの直交方向に体する熱拡散率を計算する物性値としてプラントル数を指定する。プラントル数は以下の式で求められる。

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{B.5})$$

温度拡散率は以下の式で求められる。

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{B.6})$$

ここで式 B.5、B.6 の各係数は以下の通りである。 α :温度拡散率 [m²/s]

C_p :定圧モル比熱 [J/kg/K]

本論文で使用したヌセルト数の式は求めたレイノルズ数とプラントル数を使い、以下の式になる。

層流のヌセルト数 (a/b \approx 0 のとき)^[20]

$$Nu = 4.9 \quad (\text{B.7})$$

乱流のヌセルト数

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.33} \quad (\text{B.8})$$

これらのヌセルト数 Nu を式 B.1 に代入して熱伝達係数を求める。

付録C シャントインピーダンスの計算

ここでは RCS で使われている金属磁性体コア一枚のシャントインピーダンスと径方向分割コア一式のシャントインピーダンスの比較を行う。

まず始めに、真空のトロイダルコアのインダクタンスを求める。真空コアの単位長さあたりのインダクタンス L_{0u} は以下の式で求められる。

$$L_{0u} = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} dr \quad [\text{H/m}] \quad (\text{C.1})$$

ここで r_1 はコアの内半径、 r_2 はコアの外半径である。これにコアの厚みをかけることで真空コア一枚あたりのインダクタンス L_0 が求まる。

次に RCS のコアについて考える。コアのシャントインピーダンスは式 A.13 より求まり、この式で使われている L と r は式 A.3、A.4、C.1 から求められる。コアの比透磁率はフェインメットの占積率が約 75% であることを考慮して実成分は 1800、虚成分は 3600 として計算を行う。径方向分割コアについても小、中、大それぞれのコアについて同様に計算を行う。径方向分割コアの比透磁率は以前に試作した径方向分割コアの比透磁率をもとに近似式を使って求めた値を使う。周波数は 1.7MHz とする。各コアの寸法、比透磁率は表 C.1 に示す。

	内半径 (mm)	外半径 (mm)	厚み (mm)	比透磁率実成分	比透磁率虚成分
RCS コア	187.5	425	35	1800	3600
小コア	188	279	35	1120	2760
中コア	296	377	35	1470	2060
大コア	394	475	35	1420	1680

表 C.1: コアの寸法と比透磁率

表 C.1 の値を使い、シャントインピーダンスを計算した結果は表 C.2 になる。ただし、径方向分割コア一式のシャントインピーダンスの計算は小、中、大それぞれの結果の和ではなく、コア一式全体の L と r を次の式のように扱い計算したものである。

$$L = L_s + L_m + L_b \quad (\text{C.2})$$

$$r = r_s + r_m + r_b \quad (\text{C.3})$$

ここで r_s と L_s は小コアの r と L 、 r_m と L_m は中コアの r と L 、 r_b と L_b は大コアの r と L である。

	小コア	中コア	大コア	径方向分割コア一式	RCS コア
シャントインピーダンス [Ω]	82.5	56.2	40.4	175	206

表 C.2: 各コアのシャントインピーダンス

付録D 共振周波数の計算

ここでは電磁場シミュレーションで使用したモデルの共振周波数を求める。加速空洞のモデルは $1/4\lambda$ 同軸型加速構造をしているため、この加速構造のインダクタンス L とキャパシタンス C は同軸ケーブルのインダクタンスとキャパシタンスを求める計算と同様にして求められる。しかし、ビーム軸方向の各位置での径方向の構造は一樣ではないので、図 D.1 に示す四つの経路について単位長さあたりのインダクタンス L_u とキャパシタンス C_u を求める必要がある。

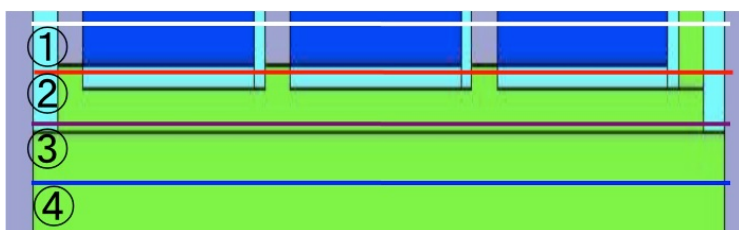


図 D.1: 積分経路

この 1~4 の経路について式 D.1、D.2 を使い、インダクタンスとキャパシタンスを計算するとこれらの結果は表 D.1 になる。

$$L_u = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_n \int_{r_i}^{r_{i+1}} \frac{\mu_i}{r} dr \quad [\text{H/m}] \quad (\text{D.1})$$

$$C_u = \frac{2\pi\epsilon_0}{\sum_n \int_{r_i}^{r_{i+1}} \frac{1}{\epsilon_i r} dr} \quad [\text{F/m}] \quad (\text{D.2})$$

ここでは r_i 、 r_{i+1} は各部位の半径、 μ_i は各部位の比透磁率、 ϵ_i は各部位の比誘電率である。

	インダクタンス L_u (H/m)	キャパシタンス C_u (F/m)	厚み (mm)
経路 1	2.780×10^{-4}	4.498×10^{-10}	105
経路 2	2.140×10^{-7}	1.156×10^{-10}	18
経路 3	2.140×10^{-7}	3.214×10^{-10}	52
経路 4	2.140×10^{-7}	4.057×10^{-10}	35

表 D.1: 各経路のインダクタンスとキャパシタンスとビーム方向の厚み

表 D.1 より、加速構造の同軸部のインダクタンス L とキャパシタンス C_1 が求められる。次に加速ギャップのキャパシタンス C_2 を求める。加速ギャップは内径 264mm、外径 282mm、高さ 30mm の円板が 2 枚向き合っていてできている平板コンデンサと考えることができる。これらのことから各部のインダクタンスとキャパシタンスは式 D.3、D.4、D.5 になる。

$$L = 2.921 \times 10^{-5} \text{ [H]} \quad (\text{D.3})$$

$$C_1 = 7.700 \times 10^{-11} \text{ [F]} \quad (\text{D.4})$$

$$C_2 = 2.278 \times 10^{-10} \text{ [F]} \quad (\text{D.5})$$

共振周波数は式 A.8 から求められる。電磁場シミュレーションではロスはないものとして行ったので、ここでは r は 0 になるため、以下の式になる。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{D.6})$$

式 D.6 の C は同軸部と加速ギャップのキャパシタンスは平行であるため C_1 と C_2 の和になる。その結果、共振周波数 f は

$$f = 1.687 \text{ [MHz]} \quad (\text{D.7})$$

となる。

参考文献

- [1] T. Kageyama, “Alternative Solutions for the Ring RF Cavity Structures.” ATAC '09, JAEA Tokai, Mar. 5-7, 2009.
- [2] J. Kameda, et al., “RF cavity loaded with oil-cooled FINEMET cores for RCS.” ATAC '07, JAEA Tokai, Mar. 1-3, 2007.
- [3] 末廣 徹:修士論文「J-PARC 主リングの加速能力増強のための新しい加速空洞冷却システムの基礎研究」(2008).
- [4] Y. Morita, et al., “RF ACCELERATING STRUCTURE LOADED WITH OIL-COOLED MAGNETIC METAL CORES.” Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, JAEA Tokai, Aug. 5-7, 2009.
- [5] K. Hasegawa, et al., “HOM analysis of Magnetic Alloy Cavity.” Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Hiroshima University Higashihiroshima city, Aug. 6-8, 2008.
- [6] J-PARC のホームページ
<http://j-parc.jp/index.html>
- [7] J-PARC 利用者協議会: J-PARC における研究の展望
http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~jparchua/share/jparc_prospects.pdf
- [8] 山崎 良成、長谷川 和男、鈴木 寛光、冨澤 正人:
J-PARC 加速器 高エネルギーニュース Vol24 No1
<http://www.jahep.org/hepnews/2005/Vol24No1-2005.4.5.6yamazaki.pdf>
- [9] 池上 雅紀: J-PARC リニアックにおける 181MeV の達成
高エネルギーニュース Vol25 No4
<http://www.jahep.org/hepnews/2006/Vol25No4-2007.1.2.3ikegami.pdf>
- [10] 吉岡 正和: J-PARC 加速器、特に MR コミッショニングに寄せて
高エネルギーニュース Vol28 No
<http://www.jahep.org/hepnews/2009/Vol28No1-2009.4.5.6Yoshioka.pdf>
- [11] M. Yoshii et al., J-PARC RING RF SYSTEMS
Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan

(August 4 - 6, 2004, Funabashi Japan)

http://www.pasj.jp/web_publish/pasj1_lam29/WebPublish/6D08.pdf

- [12] M.Muto et al.:J-PARC 50GeV-MR 電磁石電源について
第 14 回加速器科学研究発表会報告
[http://hadron.kek.jp/~muto/power_supply/references/SAST03%20\(S-166\).pdf](http://hadron.kek.jp/~muto/power_supply/references/SAST03%20(S-166).pdf)
- [13] 小関 忠:ビームコミッショニングを開始した J-PARC MR
高エネルギーニュース Vol28 No2
<http://www.jahep.org/hepnews/2008/Vol27No2-2008.7.8.9Koseki.pdf>
- [14] Accelerator Technical Design Report for J-PARC
<http://hadron.kek.jp/~accelerator/TDA/tdr2003/index2.html>
- [15] 日立金属株式会社HP より FINEMET について
<http://www.hitachi-metals.co.jp/product/finemet/index.html>
- [16] I.S.K.Gardner, “ FERRITE DOMINATED CAVITIES. ”
Proceedings of CAS,CERN92-03v2,
URL:http://cas.web.cern.ch/cas/CAS_Proceedings.html
- [17] M. Nomura, RCS 空洞コア調査の現状
2009 年 9 月 11 日の加速器担当者打ち合わせの資料
- [18] 宮本 紀之:修士論文「積層型 GSO 結晶による電磁カロリメータの開発」(2007).
http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~kunolab/papers/m-thesis/2008_miyamoto_m-thesis.pdf
- [19] 日本機会学会編:機械工学便覧 基礎編 応用編 丸善株式会社
- [20] 日本機械学会:伝熱ハンドブック 丸善株式会社
- [21] 日本複合材料学会出版委員会:プラスチック基複合材料を知る事典 アグネ
- [22] Eisuke Tokumitsu, Investigation of high-performance non-silicon switching and nonvolatile memory devices using functional oxides for integrated circuit applications.
<http://www.murata.co.jp/zaidan/annual/pdf/k01/2007/a61133.pdf>

謝辞

本研究に進めるにあたりご指導、ご助言頂きました指導教員山下了准教授^Aに心より感謝致します。本研究のことだけではなく私的なご相談を何度かさせて頂く等ご迷惑をかけることがありましたが真摯に対応して頂き、誠にありがとうございます。この二年間を無駄にせず、これからの人生に活かして行きたいと思えます。

影山達也教授^Bには多くの具体的なアイデアやご指導を頂きました事を心より感謝致します。本研究は影山達也教授のおかげで完遂できたといっても過言ではないと思えます。誠にありがとうございます。

吉川暢宏教授^Cには熱応力シミュレーションやプロジェクトの進行について、多くのご助言を頂きました事を心より感謝致します。

また、磁性体コアの圧縮試験にあたり、サンプルをご提供して頂きました吉井正人准教授^B及びサンプルの切り出しでは舟橋義聖氏^B、圧縮試験方法を考えて、行って頂きました鳥塚史郎氏^D、塚本雅俊氏^D、土谷悦子氏^Dに厚く御礼申し上げます。

吉田博夫教授^E、瀬川武彦氏^Fには開発を進めている加速構造の流路について御相談させて頂き、様々なアドバイスを頂きました両氏に感謝致します。

小林仁教授^B、吉岡正和教授^B、松本浩教授^B、小関忠教授^B、金正倫計氏^G、山本昇准教授^B、大森千広助教^Bを始めとした多くの方々のおかげでコア連絡会や、加速器担当者打ち合わせ等貴重な場に参加し、アドバイスやプロジェクトにご支援頂いた事を心より感謝致します。

また、山下研究室のメンバーには普段の生活からミーティングでのアドバイスなどお世話になりました。森田裕一氏^Hには本研究を行う上で多くの事を教えて頂きました。また、KEKの生活においても大変お世話になりました。誠にありがとうございます。村瀬君^Hには一時期僕のかわりに面倒ごとをやって頂いた事など迷惑をかける事が多かったと思えます。ここにお詫びと感謝を申し上げます。ありがとうございました。

同期の石田君^H、越前谷君^H、岡村君^H、武市君^H、マーク^Hには僕のような変人に二年間おつきあい頂きありがとうございました。

また、ここには書ききれなかったお世話になった全ての方々に感謝致します。

東京大学素粒子物理国際研究センター^A

高エネルギー加速器研究機構^B

東京大学生産技術研究所^C

独立行政法人物質・材料研究機構^D

神奈川工科大学^E

独立行政法人産業技術総合研究所^F

日本原子力研究開発機構^G

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻^H