

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

潮流発電における二重反転タービンに適用した二重電機子バルク超電導同期機に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2022-08-12 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 武井, 慎治 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2500

修士学位論文

潮流発電における二重反転タービンに適用した
二重電機子バルク超電導同期機に関する研究

2021 年度
(2022 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋システム工学専攻

武井 慎治

修士学位論文

潮流発電における二重反転タービンに適用した
二重電機子バルク超電導同期機に関する研究

2021 年度
(2022 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋システム工学専攻

武井 慎治

目次

第1章 序論.....	1
第2章 研究背景.....	3
2.1 海洋エネルギー発電.....	3
2.1.1 海洋エネルギー.....	3
2.1.2 海洋エネルギー発電.....	4
2.1.3 潮流発電.....	6
2.1.4 二重反転タービン方式.....	8
2.1.5 タービン効率.....	9
2.1.6 日本における潮流発電の開発状況.....	10
2.2 超電導と超電導バルク磁石.....	11
2.2.1 完全導電性.....	11
2.2.2 完全反磁性.....	13
2.2.3 第二種超電導体.....	14
2.2.4 磁束の量子化・ピン止め効果.....	16
2.2.5 高温超電導体.....	17
2.2.6 超電導バルク磁石.....	18
2.3 二重電機子バルク超電導同期機.....	21
2.3.1 同期発電機.....	21
2.3.2 超電導同期機.....	26
2.3.3 二重反転タービンへの適応.....	29
第3章 二重反転タービンと設計モデルのシステム概要.....	30
3.1 二重反転タービンの概要.....	30
3.2 発電機側の概要.....	35
第4章 潮流発電と二重電機子バルク超電導同期機の適応性の検証.....	38
4.1 タービン側トルクとのトルクマッチング.....	38
4.1.1 電機子の選択.....	38
4.1.2 解析概要.....	41
4.1.3 結果と考察.....	42
4.2 トルクリップルの低減.....	45
4.2.1 解析概要.....	45
4.2.2 結果と考察.....	48
4.2.3 トルクリップルを最小化するモデル.....	55
第5章 二重電機子バルク超電導同期機の最適化モデル.....	56
第6章 総括.....	59
謝辞.....	60
参考文献.....	61
List of Publication.....	63
List of Presentation.....	63

第1章 序論

近年、世界規模でカーボンニュートラルを目指す動向が活発になっており、日本でも2050年までに温室効果ガスの排出をゼロにする脱炭素社会の実現を目指すことが宣言された[1]。脱炭素社会を実現させるためには、温室効果ガスの90%以上の割合を占めているエネルギー源の二酸化炭素の排出量を零にする必要がある[2]。そのため、二酸化炭素の排出量が多いエネルギー源である火力発電を減らす必要があり、それに代わる次世代の再生可能エネルギーの利用を増やしていく必要がある。

次世代の再生可能エネルギー発電の中には、まだ十分には実用化されていない海洋エネルギーを利用した発電がある。海洋国家である我が国にとって、海洋エネルギー発電は環境にやさしい発電方式となり得ることから、火力発電の代替となる再生可能エネルギー発電の一方式として注目されている。

加えて、タービンを用いる海洋エネルギー発電の界磁部分に超電導磁石を用いることにより発電機の小型化が可能となるため、海洋エネルギー発電の課題となる海洋共生についても考慮した発電機の創出が可能となる。

従来、風力発電におけるタービンや電気推進船プロペラにより結合される超電導同期回転機的设计では、界磁極の片側に生じる磁場を電機子に対向させて利用する構造が一般的であった。しかしながら、界磁極は回転機において内面および外面の両面に磁場を生成できることから、永久磁石界磁の場合にはその両面両磁極をそれぞれ電機子巻き線に対向させて利活用する事例も散見される[3]。本研究では、高温超電導(HTS)体の結晶の塊(バルク材)を界磁極に成形して適切な着磁によって回転機に組み込んだ場合の、内面と外面両面の高磁場を永久磁石界磁と同様に利用することを試みた。この成形バルク材を潮流タービンの向き、さらには船舶推進用の同期機として界磁極の両極を電機子に対向させて利用する設計研究を行ったものである。

タービン側では出力向上のため前後に2基のタービンを設け無駄な旋回流をなくす二重反転タービンの研究や実用化が行われているが、現在まで二重反転タービンに適用した発電機は電機子と界磁極の両方を回転させる相反転方式のみであった。海流・潮流を利用した発電では現場における修理が容易ではなく、回転機構をもつ電機子と界磁子の運用には相対周回転で倍周のメリットがあるが機械的信頼性に運用リスクがあると思われる。

これらの課題を解決できる構造として、二重電機子構造を検討した。二重電機子構造とは、界磁極を固定子として配置し、その外周と内周に回転子として電機子を配置する構造で、界磁極の両面で捕捉される磁場が全て利用される特徴をもつ。界磁極に超電導バルク材の磁石を配置することで、外内周両面に高磁場を捕捉することが可能なため、上記の構造は超電導磁石の強みを最大限に活かす構造であるといえる。

さらに、回転子を二重にして前方と後方の二重反転タービンへの結合適用が可能となり、超電導磁石の高磁場を利用することで増速機なども使用せずにタービンの直結が可能とな

る。そして、2つの電機子が独立に回転するため、仮に片側の電機子に故障が起きても発電は可能で、潮流発電に関してひとつの有効な発電機構造を提供できる。また、超電導磁石よりも破壊性等に対して優位性の高い超電導(HTS)バルク磁石を用いて研究を行うことにより、今後日本での潮流発電の普及についても期待できる。

本研究では、潮流発電の実用化に向けて500 kW級の二重電機子バルク超電導同期機の電気設計を行い、磁場解析ソフトのMagNetを用い有限要素法の2次元解析により、入力機械トルクとの整合性、トルクリップルの低減を目指して最適な形を検討した。

第2章 研究背景

2.1 海洋エネルギー発電

2.1.1 海洋エネルギー

日本国内の発電電力量の構成として大部分の約80%を占めているのが火力発電であり、再生可能エネルギー発電が占める割合は16%程度である[4]。その再生可能エネルギー発電の中で、大規模な水力発電を除いた新エネルギー発電の割合が約6%となっている。しかし、再生可能エネルギーで利用されている自然エネルギーの中で海洋エネルギーを利用した発電は、まだ実用化されていない。

日本は四方が海に囲まれており排他的経済水域面積においては世界第6位という海洋資源に恵まれた海洋国である。そのため、今後の脱炭素化に向けて2050年までに温室効果ガスの排出をゼロにするカーボンニュートラルの目標を掲げている日本にとっては、この海洋エネルギーを利用した発電を増やしていくことが重要な課題となる。

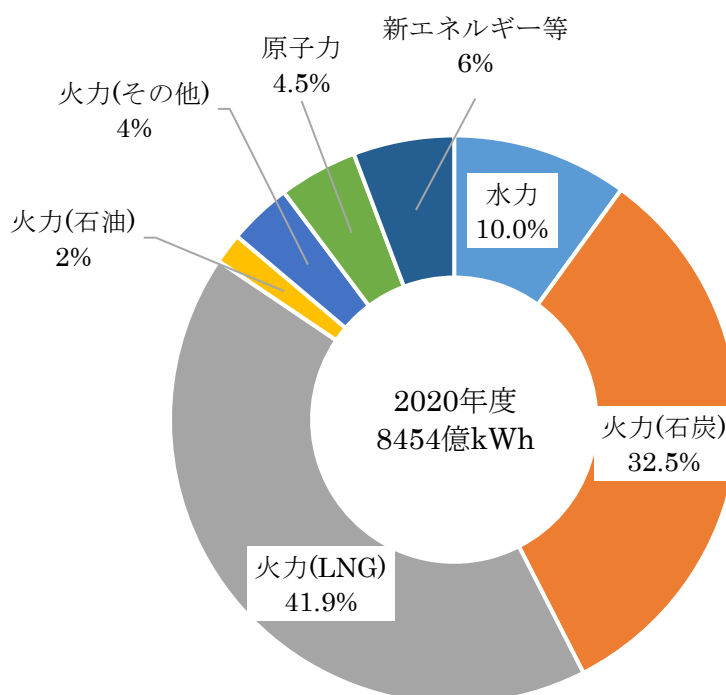


図 2.1 2020 年の日本国内の年間発電電力量の構成(電気事業者)[4]

(出典：資源エネルギー庁 電力調査統計表 2020 年度)

2.1.2 海洋エネルギー発電

海洋エネルギー発電は、太陽光発電や風力発電と異なり、天候などに左右されることなく安定的な電力が賄えると予測できる。海洋エネルギーを利用した発電の中で、現在研究が行われている主な利用例は以下である。

表 2.1 海洋エネルギーの利用例[5-6]

発電の種類	海洋エネルギーの利用方法
潮流発電	海水の流れである潮流や海流の力を利用して発電
洋上風力発電	海上に吹く風の力で発電
海洋温度差発電	海の表層と深層の温度差を利用して発電
波力発電	海の運動エネルギーを利用して発電
潮汐力発電	海の干満の差で得られる位置エネルギーを利用して発電
海洋濃度差発電	海中の塩分濃度の差を利用して発電

①潮流発電

海流・潮流を利用した潮流発電は、海水の流れによって海中に設置したタービンを回転させ発電を行う。

②洋上風力発電

海洋の広大な空間を利用し、海上に吹く風の力で発電する方法として、洋上風力発電がある。洋上風力発電には、陸上の風力発電と比較して、以下の利点がある。風況が良く風の乱れが小さいため出力が安定していること、土地や道路等に設置しないため設置場所に制約がなく大型風車の導入が比較的容易であること、景観や騒音等の影響が小さいことがあげられる。しかし、日本では洋上風力発電の設置には課題点が多い。理由の一つとして、日本近海は安価な設置に適した浅瀬が少ない状況にあることがあげられる。

③海洋温度差発電

海洋熱を利用した海洋温度差発電は、海洋表層の温水と深海の冷水の温度差を利用して発電を行う。熱帯において深海と表層の間の温度差を利用して熱機関を動かすことで発電する。アンモニアなど沸点の低い冷媒を表層の暖かい温水によって気化し、気化した気体によって発電タービンを回転させ電力を得る。太陽光発電や風力発電では天候により発電量が左右されるが、海洋温度差発電は深層水の温度が一定のため設備の稼働率が 90 %を超える安定した発電方法である。

④潮汐発電

潮汐を利用した潮汐発電は、月や太陽の引力による潮の満ち引きによって生じる潮位差を利用した発電である。湾の開口部に外海を隔てるように防波堤を設ける。その防波堤に水門を設置し、干潮時には水門を開き、潮の流れが反転するときに水門を閉じることで内海と外海に海面差をつくる。満潮時に水門を開くことで外海から海水が流れ込むためタービンが回転し発電ができる。日本には適地がないが、世界中では干満差が 8 m を超える場所がいくつかあり商用発電を行っており、初めて大規模な潮汐発電は 1996 年にフランス、ブルゴーニュ地方のランス河口に設置された。この場所の干満差は最大 13.5 m に達するため、10 MW の発電機 24 台が設置され、平均で 68 MW の発電能力をもつ。

⑤波力発電

主に海水等の波のエネルギーを利用して発電する方法である。波力発電には、振動水柱型、稼働物体型に多くは分類できる。振動水柱型では、スコットランドで 500 kW の設備が営業運転している。このタイプは、沿岸に固定した装置に波が打ち寄せると装置内の水柱が上下してタービンを回転させて発電する。稼働物体型では、Pelamis と呼ばれる 750 kW の装置が 3 機、北ポルトガル沖に設置された。この装置は直径 3.5 m の 4 つの円筒形浮体を連結し、3 か所の連結部に発電機構をもつ。

⑥海洋濃度差発電

塩分濃度を利用した塩分濃度差発電は、海水と淡水の塩分濃度の差を利用して発電を行う。この発電には、浸透圧発電と逆電気透析発電の 2 種類がある。浸透圧発電は、容器の中を膜で仕切り、片側に海水を流し、もう一方に淡水を流す。膜は水を通し塩水を通さない半透膜と呼ばれる膜を用いることで淡水が塩水側に浸透し圧力差が生じるため、この圧力差を利用して水車を回し発電を行う。逆電気透析発電は、電気透析と逆の動作を行い海水と淡水から電力を得る。この電気透析とは、陽イオン交換膜と陰イオン交換膜の間に海水を供給し、両端の電極に電圧をかけてイオン交換を行い、脱塩水を得る技術である。

本研究では、海洋エネルギーの中でも環境に優しく、天候に左右されず、安定した電力を得られるといったメリットをもつ潮流・海流エネルギーを利用した潮流発電について研究を行う。

2.1.3 潮流発電

潮流発電は、海水の流れである潮流や海流の力を利用して発電する。

潮流発電の利点としては、以下があげられる。風力発電や洋上風力発電で利用する空気と比較して潮流発電で利用する海水の密度が約 830 倍大きいため、風力発電設備に比べ設備が比較的コンパクトになる。潮流発電は海中に設置するため景観の悪化や低周波騒音による人体の影響が小さくなる。太陽光発電では天候による影響が大きく安定した発電が難しいが、海水は常に流れが発生するため潮流発電では年間を通して安定した発電が可能となる。

潮流・海流の発電方式について図 2.2 に示す。潮流タービンは潮流のエネルギー変換に使用される水車方式の中で最も用いられる方式であり、風力発電でも用いられているプロペラタービンと同じ原理である。潮流発電は、陸上の風力発電と同様に流体が持つ運動エネルギーでタービンを回転させるシステムであるが、前述した通り、海水の密度は空気の密度に比べ非常に大きいことから、わずかな流速でも高いエネルギーを得られる。

潮流タービンの解析や設計には、風車と同様の原理を使用しているため、理論的にも風車と同様の理論が用いられる。そのため、式(2.1)に示したようにタービンのパワー係数 C_p も風車のタービン出力 P を用いて与えられる。ここで、 ρ は海水の密度、 A はタービンの円盤面積、 V_0 は流速を表している。

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho AV_0^3} \quad (2.1)$$

実際に計測された流速とタービン回転数を表 2.2 に示す。日本で計測された流速や海外論文で使用されている流速では表 2.2 のように低速の流速であり、タービンの回転数も低くなってしまふ。つまり、潮流発電では海水の流速は低速のためタービン出力を向上させるには、式(2.1)よりタービンの円盤面積を大きくすることやパワー係数をできるだけ高くすることが必要となる。

しかし、大規模な潮流発電では海洋生物等の海洋環境に影響が大きいため、可能な限り海洋環境へ影響を及ぼさないように発電効率を高くしたまま小型の発電機を設計することが重要な課題となる。この課題を解決する一つとして潮流発電を小型化させる二重回転タービンと呼ばれる方式が検討された[7-9]。

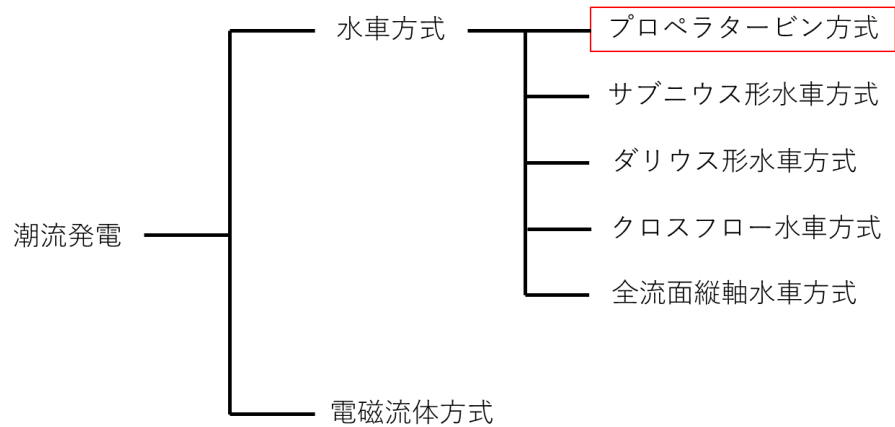


図 2.2 潮流発電の方式

表 2.2 実際の流速とタービン回転数[10]

項目	黒潮@紀伊半島沖 (平均流速)	黒潮@紀伊半島沖 (最大流速)	海外論文
流速 [m/s]	1.2	2	2.5
密度 [kg/m ³]	1025	1025	1025
発電出力 [kW]	1000	1000	1000
回転数 [min ⁻¹]	2.40	8.61	15.0

2.1.4 二重反転タービン方式

前述した通り、潮流発電には利点が多いが、課題も存在する。発電効率を向上させることや海中に設置するため海洋生物への影響を考慮して発電機を開発することが重要である。この課題の解決方法としてタービン側で検討されてきたのが、二重反転タービンである。二重反転タービンは、前後に2基のタービンを設け無駄な旋回流をなくす方式である。

潮流発電における二重反転タービン方式の利点として以下があげられる。前後2基のタービンで発電するため出力向上が期待できる。タービンの円盤面積を小さくすることができるため小型化が可能である。発電機における界磁極で用いる磁石の両面を用いる構造でも使用することができる。後方タービンが前方タービンと逆回転するため無駄な旋回流がなくなる。

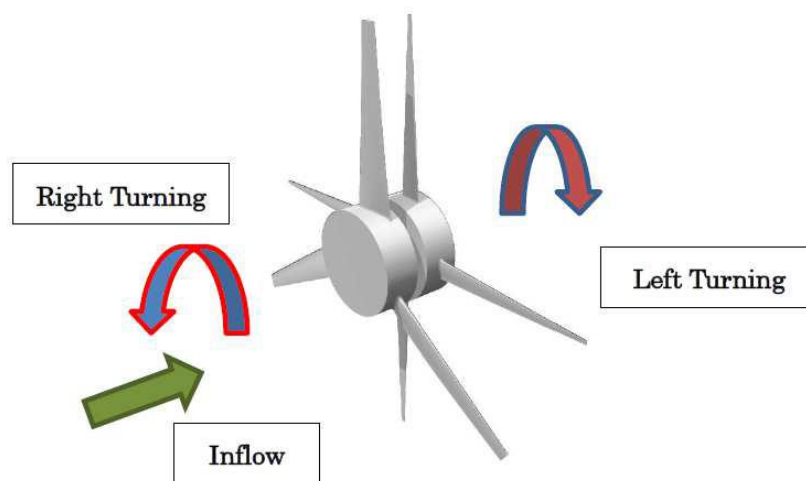


図 2.3 二重反転タービン方式[11]

2.1.5 タービン効率

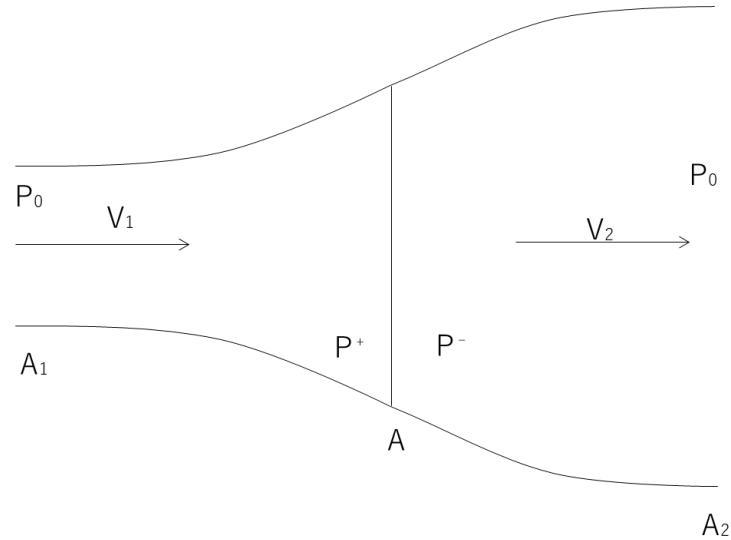


図 2.4 タービンの概念図[5]

潮流発電や風力発電など流体の運動エネルギーを変換して発電する場合、タービン効率は 100 %とはならず、ベッツの法則で導出される 59.3 %となる。ベッツの法則とは、ドイツのアルバート・ベッツによって導出された流体機械におけるエネルギー変換に関する法則である。ベッツ法則では、運動量理論を扱い導出を行う。運動量理論とは、タービン前後の流体の運動量変化と取り出すエネルギーが等しいと仮定してタービンの理想的な効率等を求める理論である。ベッツの法則による導出を以下に示す。

図 2.4 に示したのは、タービンの概念図である。ここで、 P を圧力、 A を円盤面積、 V を速度とする。質量保存の法則から式(2.2)が得られる。

$$\rho A_1 V_1 = \rho A V_{ax} = \rho A_2 V_2 \quad (2.2)$$

V_{ax} は式(2.3)であらわされる。ここで、 a は誘導係数と呼ばれる。

$$V_{ax} = V_1(1 - a) \quad (2.3)$$

ベルヌーイの法則より圧力は式(2.4)、(2.5)であらわされる。

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P^+ + \frac{1}{2}\rho V_{ax}^2 \quad (2.4)$$

$$P^- + \frac{1}{2}\rho V_{ax}^2 = P_0 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (2.5)$$

上式より圧力差として式(2.6)が得られる。

$$P^+ - P^- = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_2^2) \quad (2.6)$$

パワーで得られたエネルギーは、タービンを通過する流体の運動量の変化に等しいことから式(2.7)が得られる。ここで、 ρAV_{ax} は単位時間にタービンを通過する質量である。

$$P = \frac{1}{2}\rho AV_{ax}(V_1^2 - V_2^2) \quad (2.7)$$

誘導係数を用いると、タービン後の流速は式(2.8)のようになる。

$$V_2 = V_1(1 - 2a) \quad (2.8)$$

式(2.7)、式(2.3)、式(2.8)より式(2.9)が得られる。

$$P = 4a(1 - a)^2 \frac{1}{2}\rho AV_1^3 \quad (2.9)$$

P の最大値は、 $dP/da = 0$ によって与えられ、 $a = 1/3$ のとき最大となる。 a を式(2.9)に代入することで P の最大値を得ることができる。 P の最大値を式(2.10)に示す。

$$P = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2}\rho AV_1^3 \quad (2.10)$$

上式の $16/27 = 0.593$ は、ベッツ係数と呼ばれ、運動量理論における最大効率、すなわちタービン効率をあらわす。以上より、タービン効率は **59.3 %** となる。タービン効率は最大の発電効率となるため、この **59.3 %** を目指し発電機の効率を高くする必要がある。

2.1.6 日本における潮流発電の開発状況

近年、潮流発電について日本で大きな動向があった。環境省の潮流発電技術実用化推進事業として、九電みらいエナジー株式会社が共同実施者の長崎海洋産業クラスター形成推進協議会と長崎県五島市沖で大型潮流発電機の設置工事を開始することを発表した[12]。大型発電機を使用した潮流発電の実証は国内初となる。一般に潮流発電には 1 m/s 以上の流速が必要だが、設置場所である長崎県五島市の奈留瀬戸沖では潮流が速く最大で 3 m/s 以上となる流速がある。発電機には、世界初の大規模商用潮流発電事業 **MeyGen** プロジェクトを英国北部で実施している **SIMEC ATLANTIS ENEARGY** 社の製品を使用する。潮流発電の出力は 500 kW で高さは約 23 m となり、重量 1000 t の発電機を水深約 40 m の地点に設置して発電を行う[12]。ブレードの回転数は $7\sim 12 \text{ min}^{-1}$ となる。

2.2 超電導と超電導バルク磁石

超電導とは、特定の物質を非常に低い温度に冷却した際に電気抵抗が零になる現象のことをいう。この現象は、1908年に **Kamarlingh Onnes** が発見し、数多くの研究者により理論的、実験的な研究が行われた。

本章では、超電導の性質と本研究のモデルで用いる超電導バルク磁石について述べる。

2.2.1 完全導電性

完全導電性とは、特定の物質を常電導状態から超電導状態になる境界の温度(臨界温度) T_c 以下で冷却した際に図 2.5 のように電気抵抗が零になる現象のことである。電気抵抗は、固体物質中を電子が移動する際に結晶を作っている正イオンと衝突し電子が散乱されることによって電気抵抗が発生する[13-16]。

一般的な金属や化合物などの物質の常電導状態では、電子は一つのエネルギー準位、スピン状態に一つの電子しか入れないフェルミ粒子であり、低いエネルギー準位から順に詰まっているため、同じ運動量を持たずバラバラに運動し、格子振動や不純物によって散乱され、電気抵抗が存在することになる。

しかし、超電導状態では反対方向のスピン状態を持つ二つの電子が結晶格子の振動を介して対を組む電子対と呼ばれる状態になる。電子が電子対となることにより、常電導状態とは異なって、一つのエネルギー状態に多くの電子対が入ることが可能となるボース粒子としてふるまう。常電導状態と超電導状態におけるエネルギーの状態を図 2.6 に示す。電子が電子対となると一つのエネルギー状態に多く入るため、電子は全て同じ運動量を持つことになる。各電子対の運動量が同じ状態になり電子同士が強い繋がりを持つため、ここに電場が加わり一斉に電子が動き出しても電子が散乱することなく電場によって加速される。これにより、電気抵抗が発生しない状態となる。これが、電気抵抗が零になる原理である。

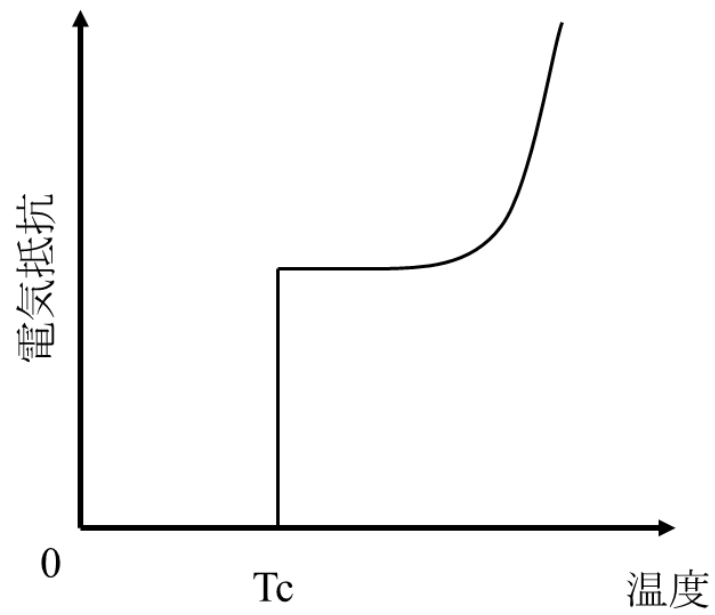


図 2.5 超電導体の電気抵抗の温度依存性[5]

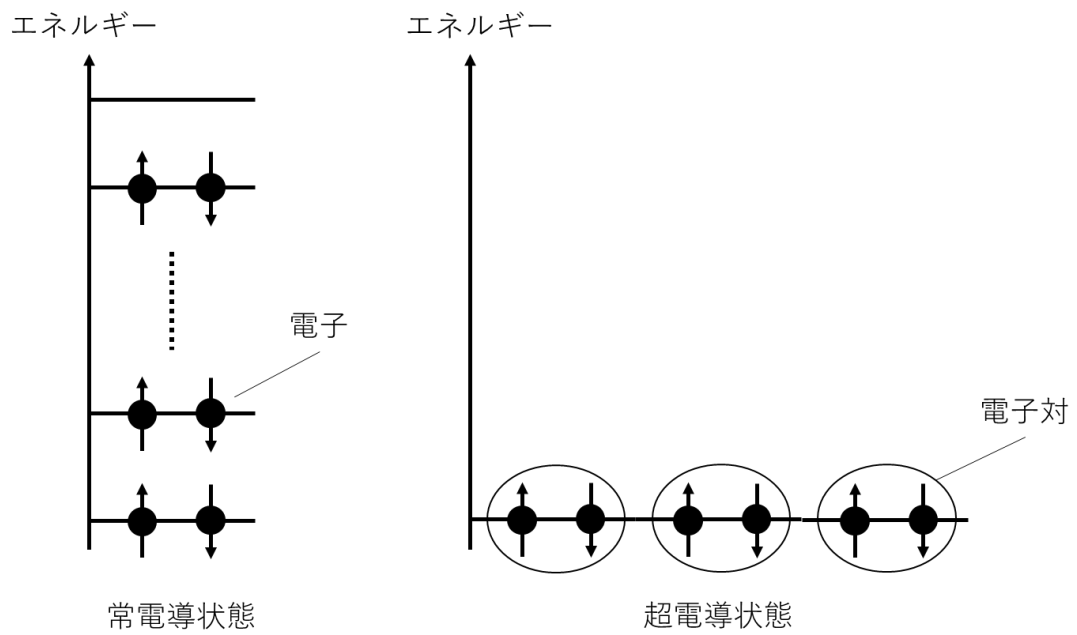


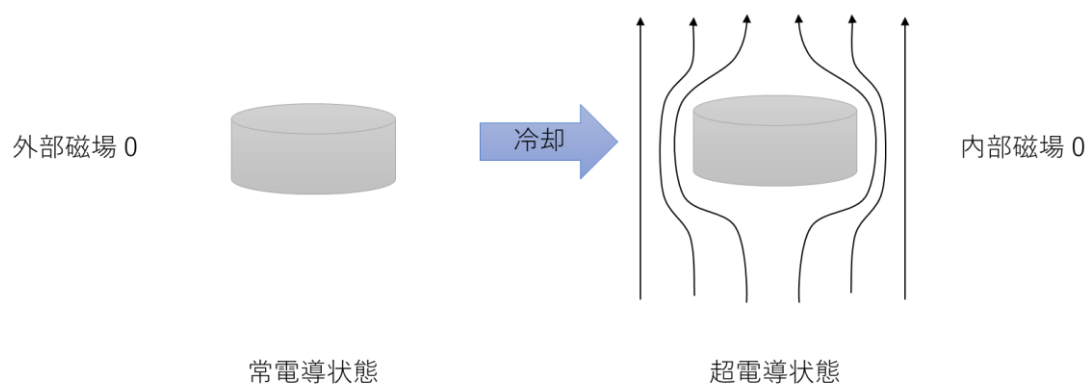
図 2.6 超電導状態と常電導状態のエネルギー状態

2.2.2 完全反磁性

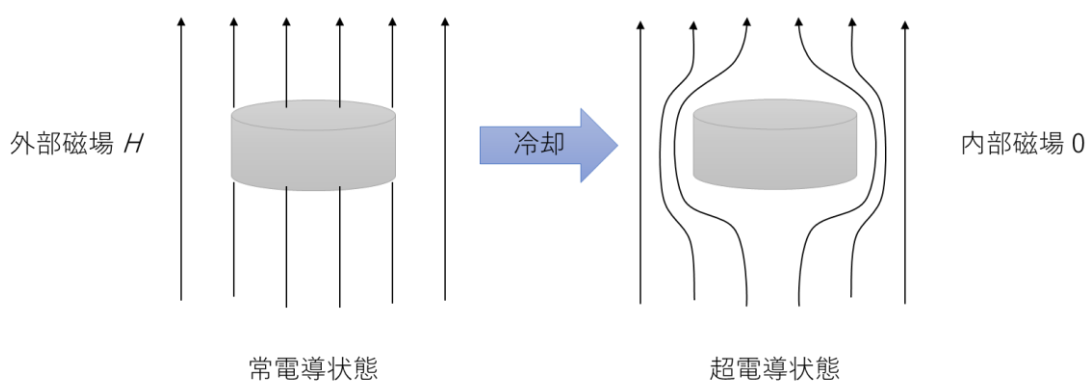
完全反磁性とは、超電導体が磁場を排除する現象のことである。この現象を発見者にちなんでマイスナー効果という。マイスナー効果では、常電導状態から超電導状態になるまで外部磁場の印加の有無に関係なく、超電導体が磁場を排除し内部磁場は零となる[12-15]。

超電導体に外部磁場を印加すると、レンツの法則により外部磁場の変化を妨げる方向に誘導される電流が流れる。完全導電性により超電導体の電気抵抗は零となるため、誘導された電流は永久に流れ続ける。よって、図2.7(a)のように超電導体に外部磁場を印加すると、その磁場を打ち消す向きに電流が流れるため、超電導体には磁場が侵入できない。

また、完全導体では電磁誘導と電気抵抗が零である性質上、常電導状態で外部磁場を印加したまま冷却すると、電磁誘導が生じず内部磁場を排除することはなく、外部磁場を取り去るとそれを妨げる方向に電流が誘導されるため、内部磁場が発生することになる。しかし、超電導体は、完全導体とは異なり、図 2.7(b)のように常電導状態から超電導状態になるまで外部磁場を印加していても内部磁場は零となる。



(a) 超電導状態で外部磁場を印加した場合



(b) 常電導状態から外部磁場を印加し超電導状態にした場合

図 2.7 マイスナー効果

2.2.3 第二種超電導体

超電導体には、第一種超電導体と第二種超電導体の 2 種類に分けることができる。第一種超電導体と第二種超電導体の内部磁場としての違いを図 2.8 に示し、第二種超電導体の磁化曲線を図 2.9 に示す[12-15]。

第一種超電導体には、図 2.8 で示した通り常電導状態と超電導状態の 2 つしか変化が存在しない。ある磁場まで磁場を高くしていくと、臨界磁場でマイスナー効果が突如消失し、磁化が零になり常電導状態となる。

第二種超電導体には、図 2.8 で示した通り常電導状態と超電導状態に加え、混合状態が存在する。混合状態とは、常電導状態と超電導状態の間に存在し、マイスナー効果によって内部磁場が零の超電導体に磁束線が部分的に侵入する状態のことである。超電導状態を一部壊して侵入した磁束線のある一部分が常電導状態となる。磁化の変化については、図 2.9 に示した通り、下部臨界磁場 H_{c1} までマイスナー効果が生じており第一種超電導体と同じ変化を示すが、 H_{c1} 以上、上部臨界磁場 H_{c2} 以下の中間の磁場では混合状態となり、なだらかに常電導状態となる。第二種超電導体によって、強磁場中でも超電導利用することができるようになったため、回転機応用など磁石として超電導体を応用するのに利用される。本研究でも第二種超電導体を磁石応用している。

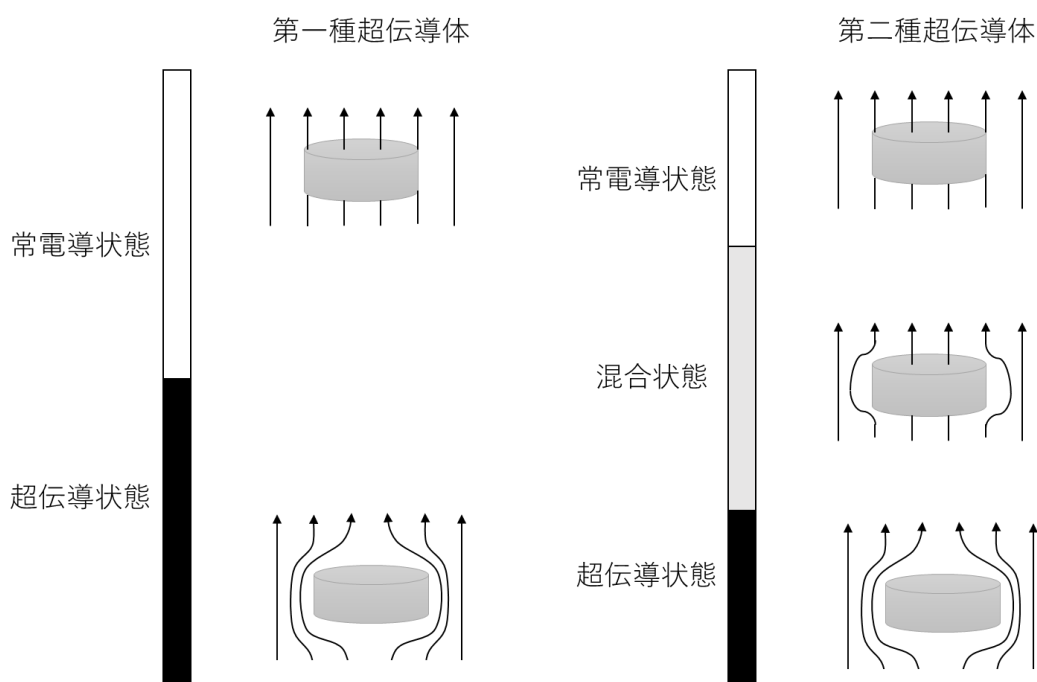


図 2.8 第一種超電導体と第二種超電導体の内部磁場

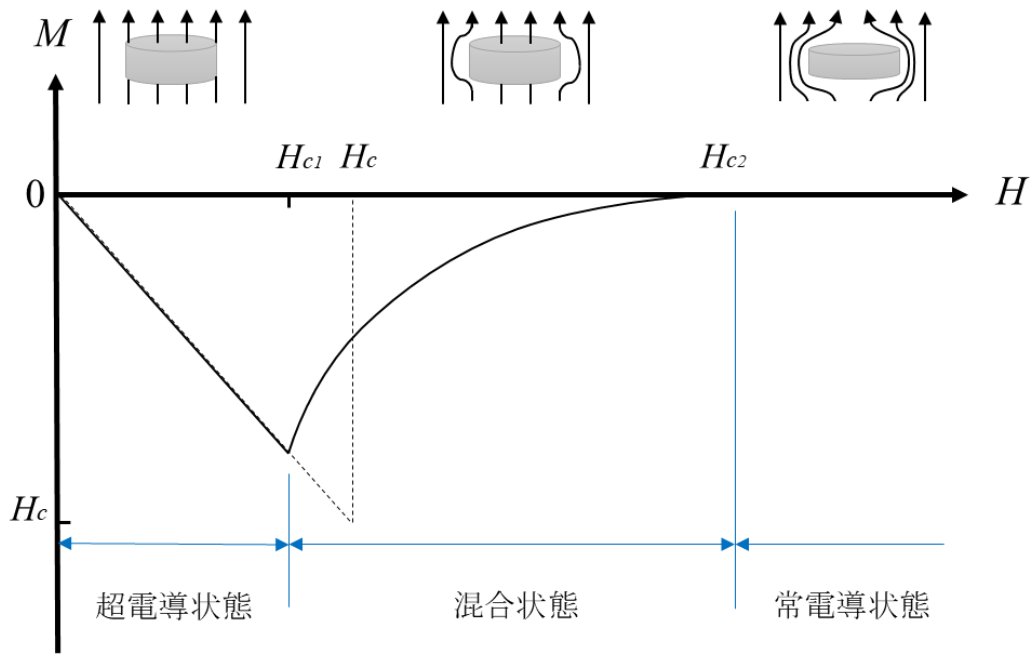


図 2.9 第二種超電導体の磁化曲線

2.2.4 磁束の量子化・ピン止め効果

前述した第二種超電導体において、外部磁場は超電導体内部に磁束が侵入する混合状態では、各々が磁束の量子をもった筒状の磁束が規則的に並んだ配列で侵入する。侵入した磁束は以下の式で量子化される。 ϕ は侵入した磁束、 e は素電荷、 h はプランク定数である。 n には整数値が入る。

$$\phi = n \frac{h}{2e} \quad (3.1)$$

第二種超電導体の混合状態では、超電導状態を一部壊して磁場を侵入させ、超電導領域に永久電流を発生させることにより常電導領域で量子化された磁束が捕捉できる。しかし、この状態に電流を流すと電流は抵抗のない超電導領域を流れ、電流が流れる超電導体に量子化された磁束があることによって、図 2.10 に示したように磁束にローレンツ力が働き磁束が動き出してしまふ。常電導領域で捕捉されている磁束が動くことによって常電導にある電子が運動してしまい、エネルギーの散逸が起き電気抵抗が発生することになり、完全導電性が失われることになる。

この磁束の動きを阻止する働きをするのがピン止め効果と呼ばれる現象である。このピン止め効果は、超電導体に不純物を混ぜて不均一な超電導体にすることで生じる。常電導の不純物を混ぜることにより、超電導体内に常電導の微細な粒が分散した状態になる。この不純物により、磁束は超電導状態を破壊して常電導状態にするよりも、常電導の不純物の部分を貫通した方がエネルギー的に有利なため、超電導状態を破壊することなく磁束を捕捉することが可能となる。不純物を通して捕捉された磁束は動かなくなるため、電気抵抗の発生がなくなり、完全導電性が失われることがなくなる。

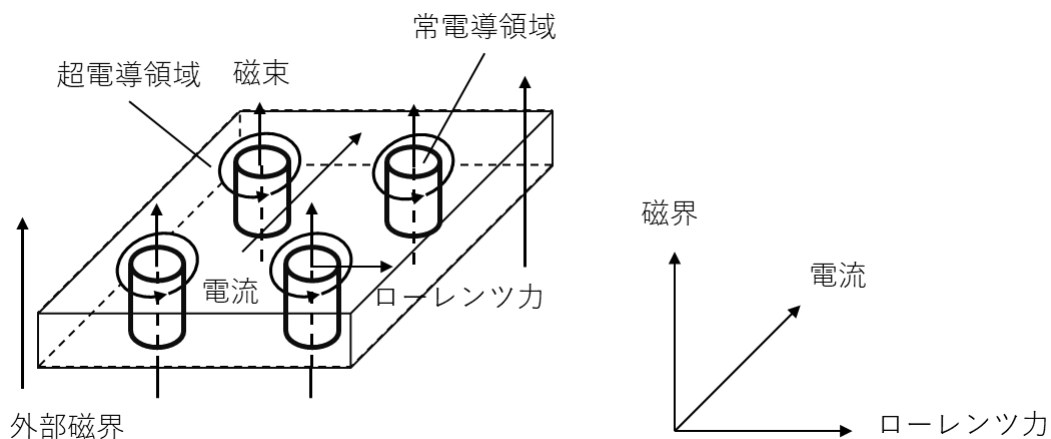


図 2.10 超電導体の電流と磁束によるローレンツ力

2.2.5 高温超電導体

超電導の実用化にあたり、超電導体に使用できる冷媒を増やすために超電導体の臨界温度 T_c を高くすることが求められる。しかし、温度を上昇させると物質の格子振動が大きくなるため、電子対の形成ができなくなり超電導体にならなくなってしまふ。その一方で、臨界温度 T_c を高くするために発見されたのが酸化物を用いた高温超電導体である。図 2.11 には、超電導体の臨界温度の変遷について示した。図からも分かるように、酸化物超電導体が発見されてから、短時間で多くの高温超電導体が発見された。高温超電導体の中でも、臨界温度 T_c が 90 K の Y-Ba-Cu-O 系、110 K の Bi-Sr-Ca-Cu-O 系、125 K の Tl-Ba-Ca-Cu-O 系が発見され、超電導体を冷却する冷媒として液体窒素（常圧沸点 77.3 K）の使用が可能となった。それまでは臨界温度 T_c が低かったため、液体ヘリウム（常圧沸点 4.2 K）で使用する必要があった。液体窒素は、液体ヘリウムと比較して資源、コストの両面で使用しやすい。

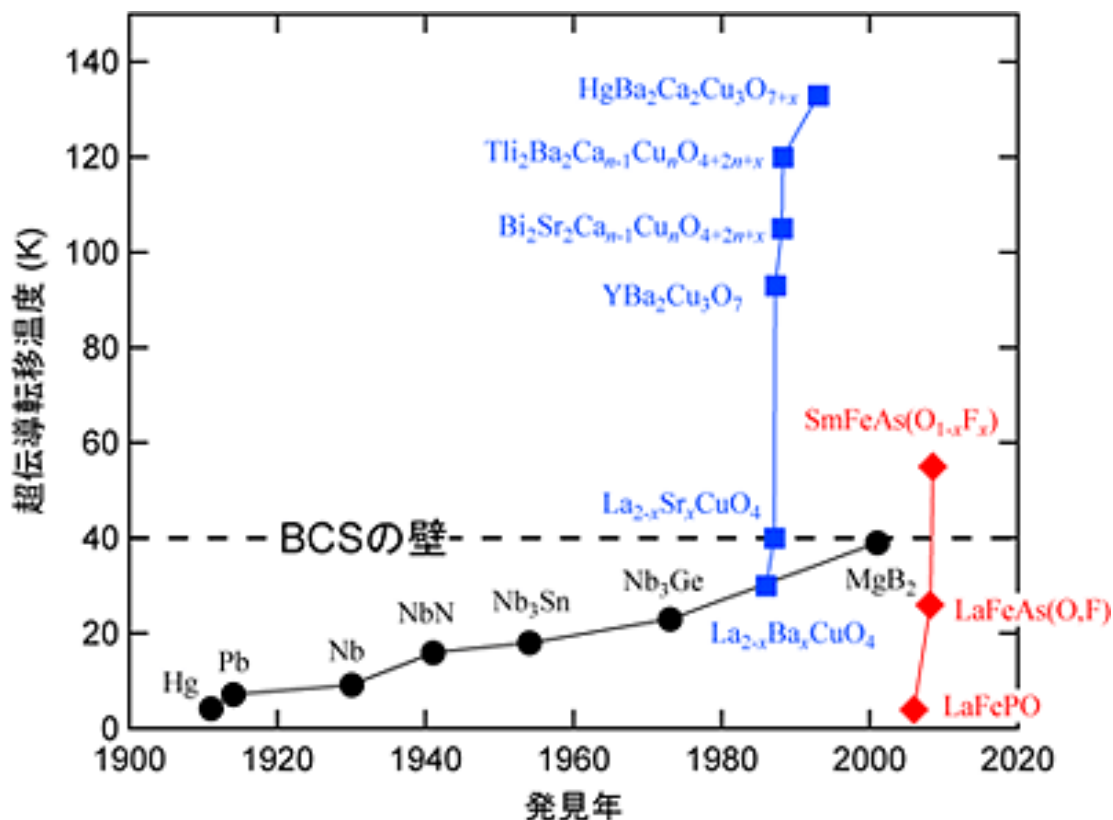


図 2.11 超電導体の臨界温度の変遷[13]

2.2.6 超電導バルク磁石

超電導バルク磁石とは、超電導バルク材料（以下バルク材）と呼ばれる超電導体の結晶の塊に外部からの磁場を印加し冷却することにより、外部磁場とほとんど同じ磁場が捕捉された磁石である。超電導バルク磁石の外観を図 2.12 に示す。バルク材を着磁する方法には、一般的な磁場中冷却着磁法（FCM）の他に、ゼロ磁場中冷却着磁法（ZFC）やパルス着磁法（PFM）がある。FCM法は、静磁場を用いた着磁方法の一つであり、臨界温度 T_c 以上の温度で外部磁場を印加し、臨界温度 T_c 以下に冷却した後、外部磁場を取り除く方法である。ZFC法は、超電導体を臨界温度 T_c 以下の温度に冷却した後外部磁場を最大まで増加させ、磁束を侵入させた後に外部磁場を取り除く方法である。PFM法は、冷凍機を用いてバルク材を臨界温度 T_c 以下の温度に冷却した後周囲に配置したソレノイド型銅コイルに 1 秒以下のパルス状電流を流し、超電導体に短時間だけ大きなパルス磁場を印加し磁束をバルクに捕捉させる方法である。

全ての着磁方法での捕捉された磁束による主な磁場分布は、図 2.13 に示したように円錐状の磁場分布となり、バルク材の中心で最大値となる。



図 2.12 超電導バルク磁石の外観

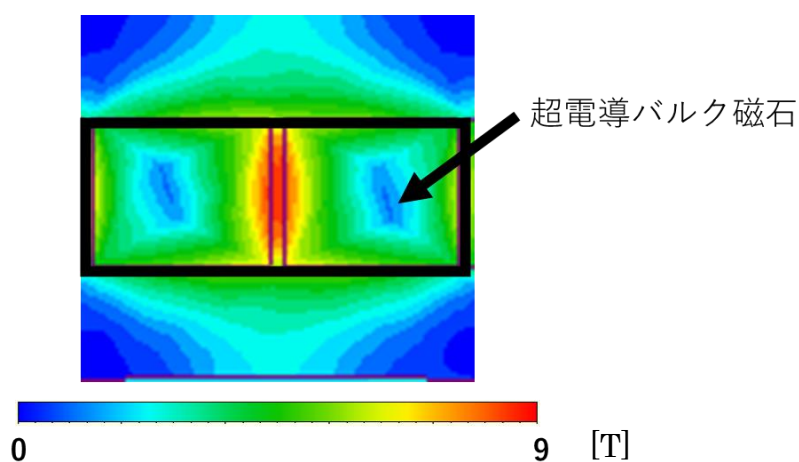


図 2.13 超電導バルク磁石の磁場分布

超電導バルク磁石には、多くの利点がある。その中で、回転機応用での主な利点を以下に示す。

①付帯設備の容量のコンパクト化

超電導磁石では、巻線への通電用電源等が必要になり、超電導体以外の付帯設備の容量が大きくなってしまう。一方、超電導バルク磁石では通電用電源が不要なため付帯設備の容量も小さくすることができる。また、通電用電源を必要としないため、電流リード等を介した外部からの熱侵入も防ぐことが可能となる。

②熱容量の向上

超電導体にとって熱容量が高くなることは温度が上がりにくくなるため、優位的であるといえる。

熱容量は以下の式から求められる。 m は質量、 c は比熱を表している。

$$C = mc \quad (3.2)$$

以上の式から熱容量は、比熱が高くなることにより向上する。超電導磁石の場合、超電導磁石のもととなる超電導線材は多重構造になっており、線材の超電導の割合が約 1.03 % と非常に薄い構造になっている。一方、超電導バルク磁石はバルク材自体が超電導の塊であるため、超電導の割合が非常に高い。そのため、超電導磁石が超電導バルク磁石と同じ高磁場を発生させるには、電流密度を大きくする必要がある。その結果、超電導線材の比熱が小さくなり、熱容量が低くなる。超電導バルク磁石では、比熱が大きくなり、熱容量が大きくなる。

③クエンチ

超電導バルク磁石にはクエンチに対しても優位性がある。クエンチとは、超電導体に大きなジュール熱が発生することにより温度が上昇し、超電導体がなだらかに常電導体に転移する現象のことである。極低温域では、格子振動によるエネルギーが小さいため、超電導体の比熱が小さくなり、その状態で超電導体の一部領域が熱的不安定性で超電導状態から抜けて常電導状態に転移する。電気抵抗が発生してしまうことにより超電導体には大電流が流れているため、大きなジュール熱が生じる。このクエンチという現象は、超電導体の故障の原因となる。先述した通り、超電導バルク磁石は超電導磁石と比較して比熱が高く熱的安定性が高いため、クエンチが起きにくくなる。図 2.14 には、実際にクエンチが起きた超電導磁石のコイルについて示している。

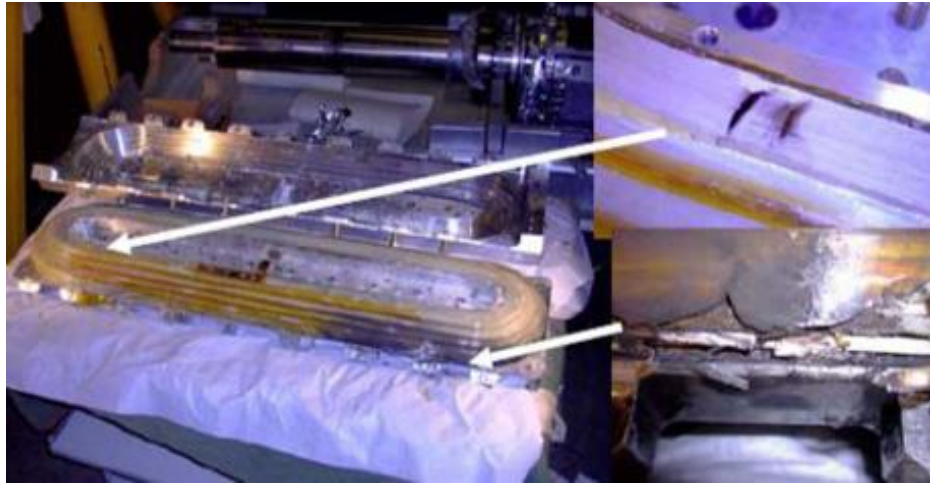


図 2.14 クエンチによるコイルの焼損

④破壊性

超電導バルク磁石ではそれぞれが磁場を発揮することでモータとしての役割を果たすのに対して、超電導コイルは電流を流すことで初めて超電導としての役割を果たすという明らかな違いがある。このことから超電導コイルを利用するには本体だけでなくコイルに電流を流すリード線や導入端子が必要となるため、断線のリスクがさけられない。そのため、超電導コイルは全体を含めどこかが破断した場合使えないというリスクがある。超電導バルクではそのような断線のリスクがないため優位性があると言える。そして超電導バルクがより利便性がある点として、破損や割れるなどの事態が起きても個々の中で永久電流が流れ、減磁はするが消磁はしないという特性がある。

2.3 二重電機子バルク超電導同期機

本章では、本研究室で電気設計モデルを開発した二重電機子バルク超電導同期機の優位性について説明する。

2.3.1 同期発電機

同期機の一般的構造は、磁束を発生させる界磁と電気出力を受け持つ電機子からなる。界磁は銅と鉄からなる電磁石や永久磁石が使われている。電機子は主に電子巻線とティースによって構成される。ティースの役割は、電機子巻線を保持し、磁束の通路である。同期機には、回転界磁形と回転電機子形の2種類あり、多くの用途で用いられているのが回転界磁形となる。回転電機子形の用途では、電機子部分を大きく重くする場合に用いられる。外部から得られる出力波形が歪んでいる場合、電機子を大きく重くすることで発電時の出力波形の歪みを減らすことが可能となる。ここでは、基礎的な形である回転界磁形を用いて同期機に関して説明を行う。

本研究では、回転電機子形の同期機を採用した。

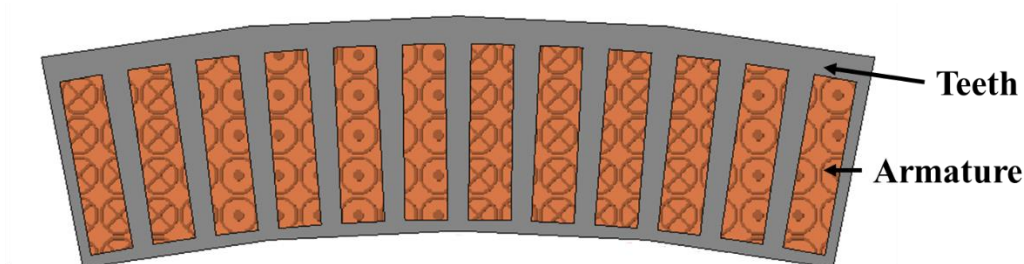


図 2.15 電機子の構成

三相同期発電機では、電機子巻線の電気角が $2\pi/3$ rad ずつ隔てて巻いた三相巻線で構成されている同期機である。電気角 $2\pi/3$ rad ずつ隔てて巻くことによって、図 2.16 に示したように、 $2\pi/3$ rad の位相差を持った三相起電力が得られる

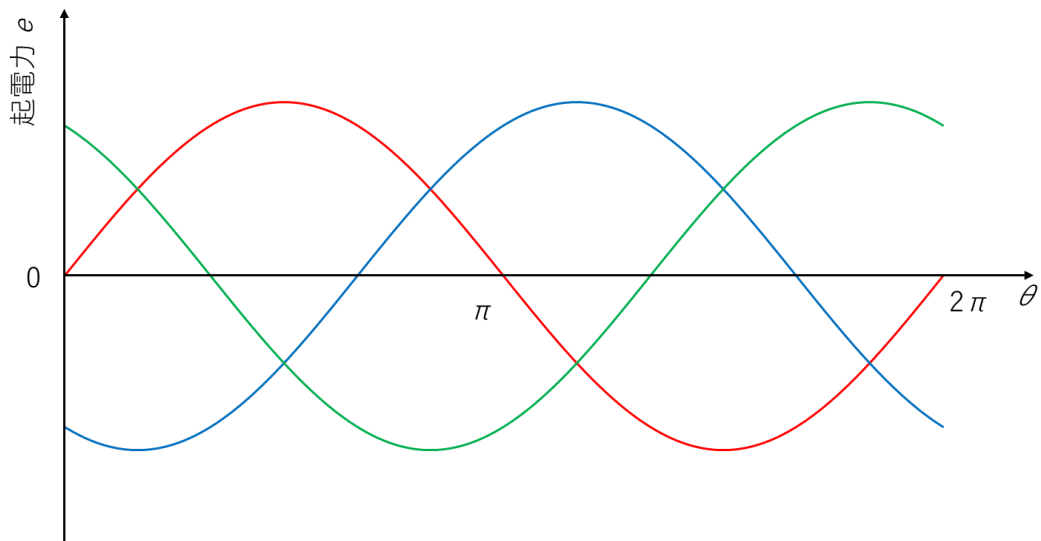


図 2.16 三相起電力の波形

同期機の同期速度を求める式を以下に示す。同期速度は N_s 、周波数は f 、界磁の極数は p で表している。

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (4.1)$$

同期発電機が負荷に電力を供給し発電機の電機子巻線に電機子電流が流れると、電機子に磁束が生じこの磁束が界磁磁束（主磁束）に影響を与える電機子反作用と呼ばれる現象が生じる。この作用によって誘導起電力が変化する。この作用は負荷の力率によって異なった電機子反作用が生じる。電機子反作用の説明として、図 2.17 の基本的な構造を用いる。

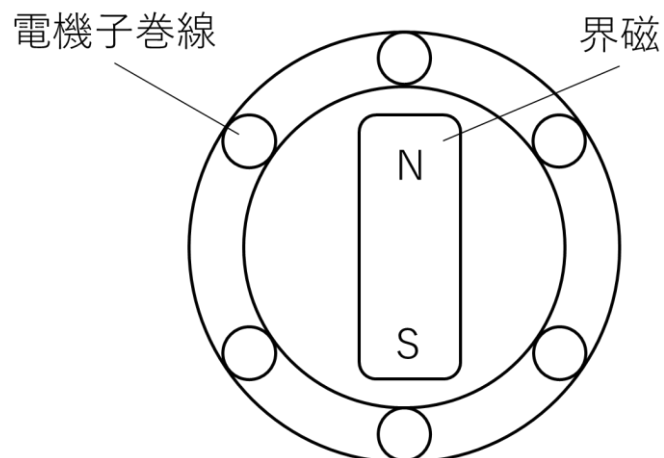


図 2.17 同期機の基本的な構造

まず、力率 1 の場合では、交さ磁化作用が生じる。力率 1 の場合、電機子巻線に発生する電流は、フレミングの右手の法則により、図 2.18 のようになる。電機子電流は、右ねじの法則より、赤色で示したような磁場が発生する。界磁の左側では磁場が強め合っている増磁作用が働き、界磁の右側では磁場が弱めあっている減磁作用が働く。このように、界磁の右側と左側で逆の作用が働くことを交さ磁化作用という。

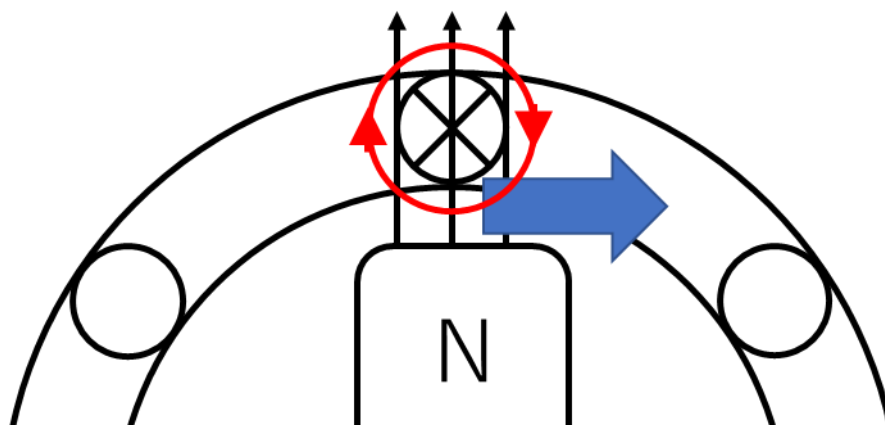


図 2.18 交さ磁化作用

次に、力率の遅れ力率が 0 の場合では、減磁作用が働く。遅れ力率が 0 とは、力率角が $-\pi/2$ rad のことである。遅れ力率では、電機子電流が遅れるため、図 2.19 のような状態となる。この場合では、図 2.19 のように界磁から発生する磁束が電機子から発生する磁束によって弱められる。このような作用を減磁作用といい、発電機の誘導起電力は減少する。

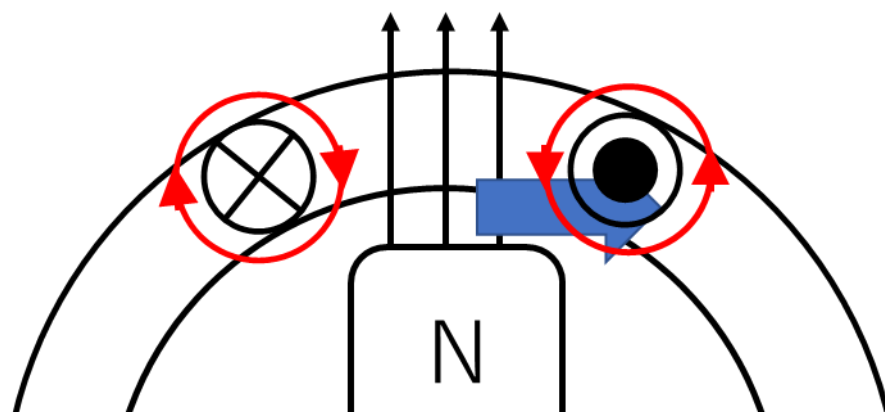


図 2.19 減磁作用

最後に、力率の進み力率が0の場合では、増磁作用が働く。進み力率が0とは、力率角が $\pi/2$ radのことである。進み力率では、電機子電流が進むため、図 2.20 のような状態となる。この場合では、図 2.20 のように界磁から発生する磁束が電機子から発生する磁束によって強められる。このような作用を増磁作用といい、発電機の誘導起電力は増加する。

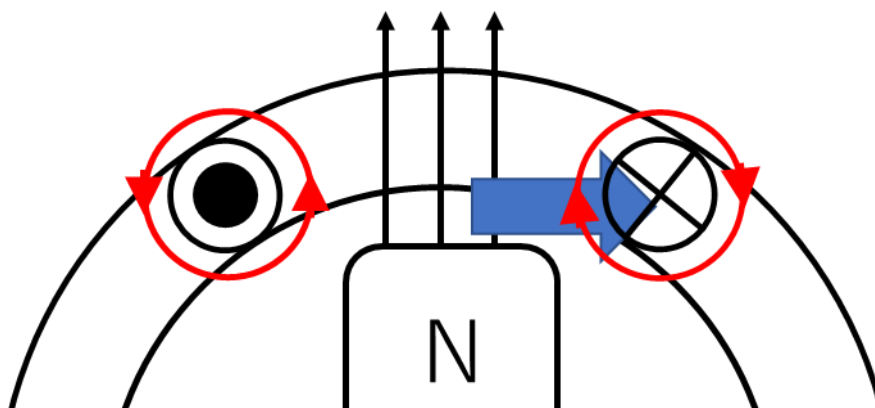


図 2.20 増磁作用

この増磁作用は同期発電機の自己励磁現象を発生させる原因となることがある。自己励磁現象とは、発電機が無励磁であっても界磁回路の残留磁気によって発生した起電力が進み負荷に流れることで増磁作用が起こり、起電力が増大し、さらに進み電流が増加することを繰り返して端子電圧がある極限值まで上昇する現象である。自己励磁現象が生じると発電機の絶縁破壊を起こすことがある。自己励磁現象対策として、変圧器やリアクトルを接続し充電電流を抑制することや、発電機を並列運転し一台当たりの充電電流を抑制すること、以下の式で表される同期インピーダンスの小さい発電機を使用すること等があげられる。

$$Z_s = \sqrt{r_a^2 + x_s^2} \quad (4.2)$$

複素数表示で表すと以下の式となる。

$$\dot{Z}_s = r_a + jx_s \quad (4.3)$$

上式の同期インピーダンスとは、同期発電機の内部インピーダンスのことである。図 2.21 は三相同期発電機の等価回路を示している。同期インピーダンス \dot{Z}_s は電機子巻線抵抗 r_a と同期リアクタンス x_s からなっている。さらに、同期リアクタンスは電機子反作用による影響を等価的にリアクタンスの変化に置き換えた電機子反作用リアクタンス x_a と漏れリアクタンス x_l との和となる。実際には、電機子巻線抵抗が非常に小さいため、以下のような式で扱うこともある。

$$\dot{Z}_s \cong jx_s \quad (4.4)$$

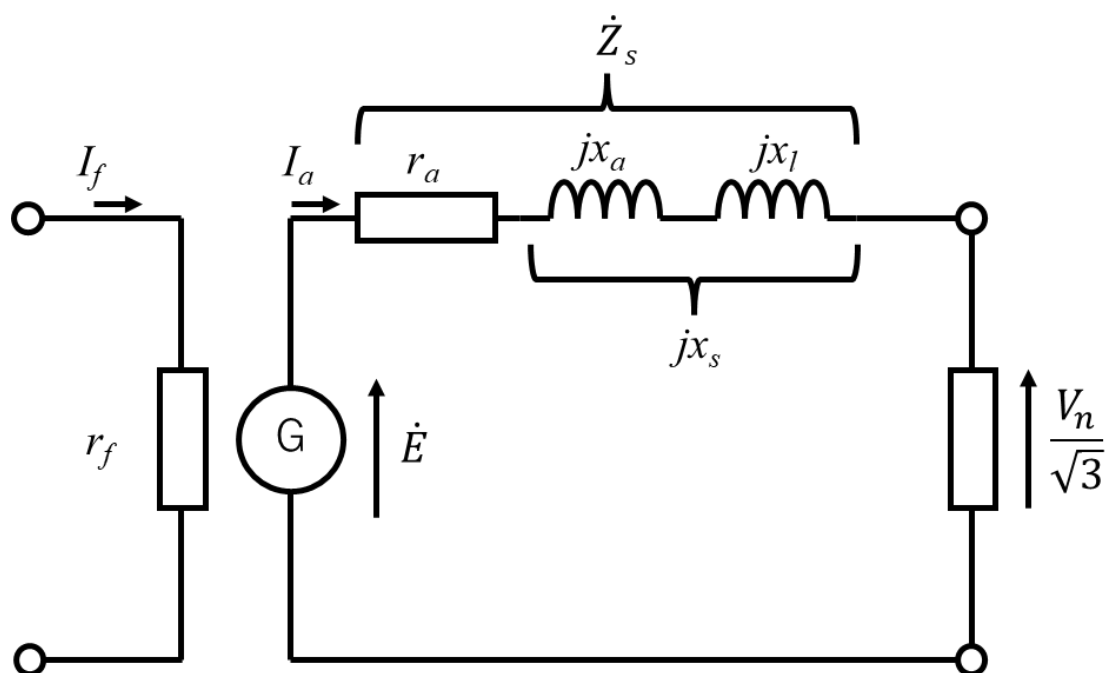


図 2.21 同期発電機の等価回路

本研究では、同期機の界磁を超電導化させる。同期機の界磁を超電導化させたことで、同期機の大容量化と小型軽量化が可能となる利点がある。界磁の超電導化により、空隙磁束密度（磁気装荷）を高くすることが可能となるため小型軽量となる。

2.3.2 超電導同期機

超電導同期機の基本構造は、超電導巻線を用いた界磁巻線や超電導バルク磁石が回転し、固定子に電機子巻線を有する構造であり、超電導巻線や超電導バルク磁石は冷却が必要になるため、冷却装置が付いた状態となる。

同期機の界磁を超電導化させたことにより、同期機の大容量化と小型軽量化が可能となる。界磁の超電導化により、空隙磁束密度（磁気装荷）を高くすることが可能となるため、小型軽量となる。

図 2.22 の超電導回転機の俯瞰図は、本研究室で製作した 30 kW 定格の超電導回転機の実証試験機である。その概略図を図 2.23 に示す。モータ、冷凍機、そしてそれらを繋ぎ冷凍機から冷媒を供給する接続装置に分かれている。モータ部分では回転子に界磁極が取り付けられており、その界磁極の中に超電導バルク磁石が設置されている。また、冷凍機から回転式の冷媒供給装置を通して冷媒はモータ内部の熱交換機に供給されている。この熱交換機は、サーモサイフォンシステムを使用している。このため、熱交換器内で蒸発した冷媒が界磁極の下の銅板を介して熱伝導し界磁極内部の超電導バルク磁石を冷やすシステムになっている。

冷却方法には、本研究室で用いているサーモサイフォンとヘリウム圧送の 2 つの方法が存在する。サーモサイフォンによる冷却システムの利点としては、構造が簡単であること、軽量でありコンパクトであること、動作に外部から仕事を加える必要がないこと等があげられる。図 2.24 に超電導同期機の冷却システムの概略図を示す。冷却システムより、サーモサイフォンと伝導伝熱部を介して超電導磁石を冷却する構造となっている。回転体と冷却システムは回転継手で接続されており、回転体が回転しても冷却システムは回転しない構造となっている。

冷却システムに用いるサーモサイフォンとは熱輸送デバイスであるヒートパイプの一種であり、通常ヒートパイプは毛細管現象により作動流体の還流を行うが、サーモサイフォンは重力により還流を行う。サーモサイフォンの概略図を図 2.25 に示す。

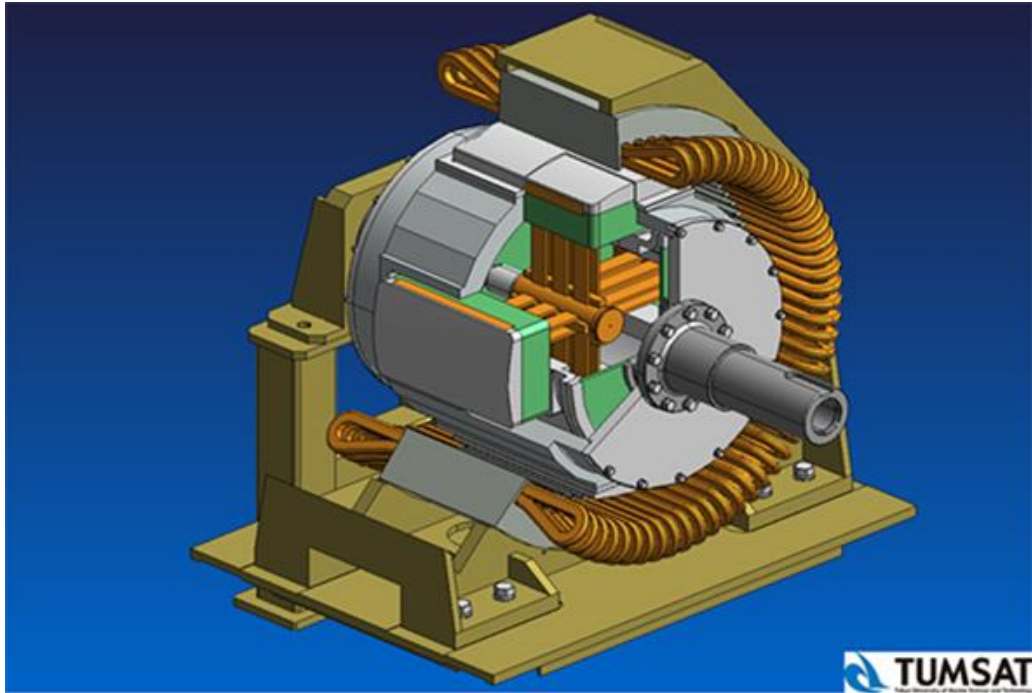


図 2.22 超電導回転機の俯瞰図[17][18]

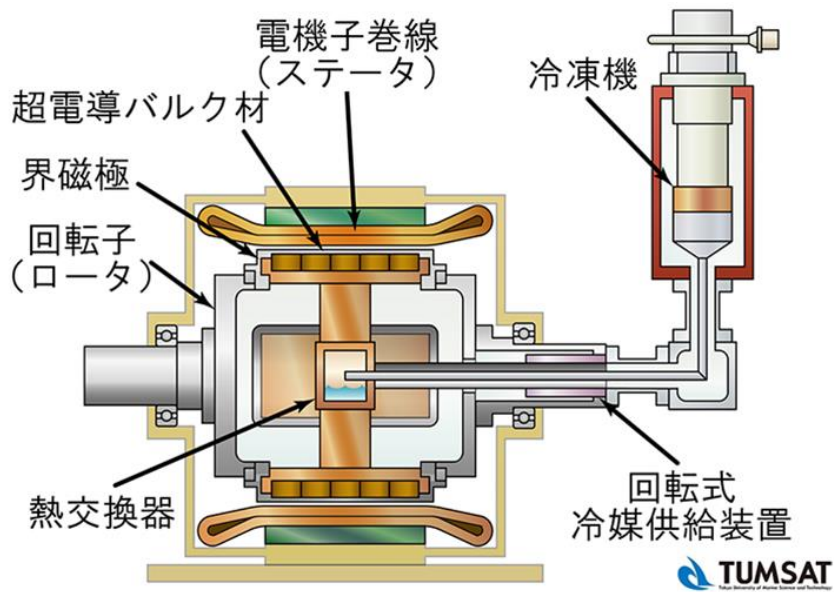


図 2.23 超電導回転機の概略図[17][18]

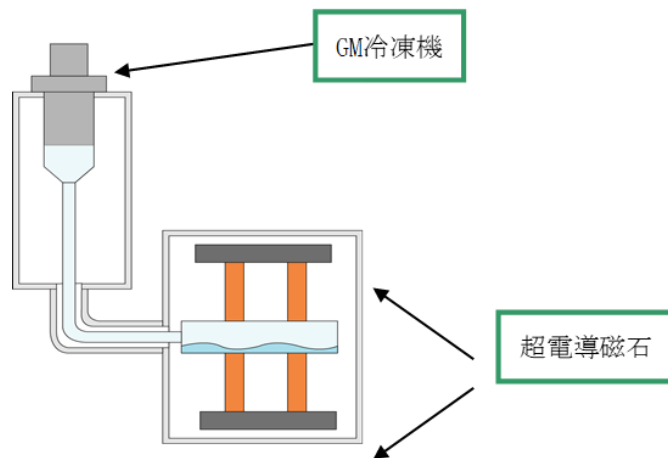


図 2.24 超電導回転機の冷却システム概略図

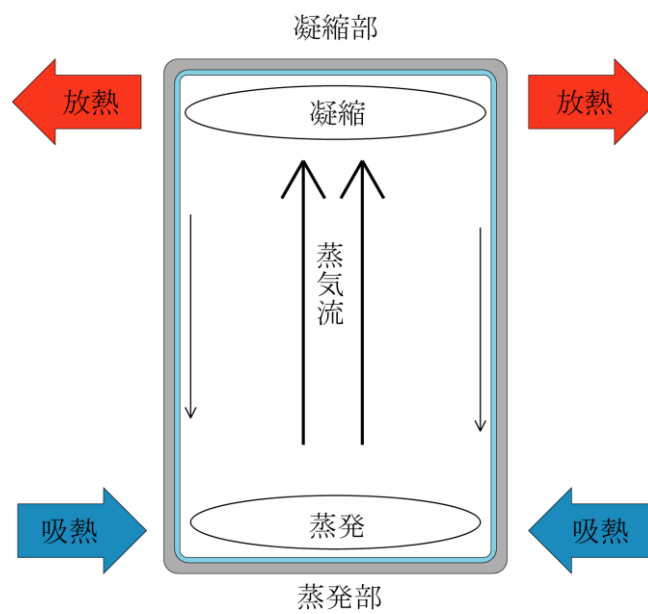


図 2.25 サーモサイフオンの概略図

2.3.3 二重反転タービンへの適応

近年、タービンの高効率化を目指し二重反転タービンが研究されるようになった。二重反転タービンは、前述したように前後に 2 基のタービンを設け無駄な旋回流をなくす方式である。しかし、2 基のタービンを回転させることは、接続する発電機側も回転させる部分が 2 つ必要となる。現在まで、二重反転タービンに適用した発電機は電機子と界磁の両方を互いに逆方向に回転させる相反転方式のみであった。相反転方式は、電機子と界磁が逆回転するため、相対周回転が増加し起電力の増加が見込めるが、現場での修理が容易ではない海流・潮流を利用した発電では、機械的信頼性に運用リスクがあると思われる。

そこで、上記の課題を解決できる構造として二重電機子構造を検討した。二重電機子構造とは、界磁極を固定子として配置し、その外周と内周に回転子として電機子を配置する構造である。この構造では、電機子が 2 つ別々に回転するため、仮に片側の電機子に故障が起きても発電は可能で、潮流発電に関してひとつの有効な発電機構造を提供できる[19]。

そして、二重電機子構造の同期機の界磁に超電導バルク磁石を用いることにより、外内周両面に高磁場を捕捉することが可能なため、出力を約 2 倍にすることが可能となる。

第3章 二重反転タービンと設計モデルのシステム概要

本章では、潮流発電に搭載する二重反転タービンと当研究室で電気設計を行った二重電機子バルク超電導同期機モデルのシステム概要について説明をする。

3.1 二重反転タービンの概要

本研究の潮流発電で使用する二重反転タービンは、過去に共同研究を行っていた海上技術安全研究所(海技研)の研究結果を使用した。以下に海技研であげられた研究成果を示す[11]。

潮流発電の概略図を図 3.1 に示す。緑色で示されている部分が前段のタービン、青色で示されている部分が後段のタービンの二重反転タービンとなっている。二重反転タービンへの海水の流入速度は 2.5 m/s としている。タービン直径を 14.5 m、発電効率を 0.92、前後タービンの発生トルクはそれぞれの回転数に比例することを設計条件とし、タービンの最適な回転数を求めた[11]。

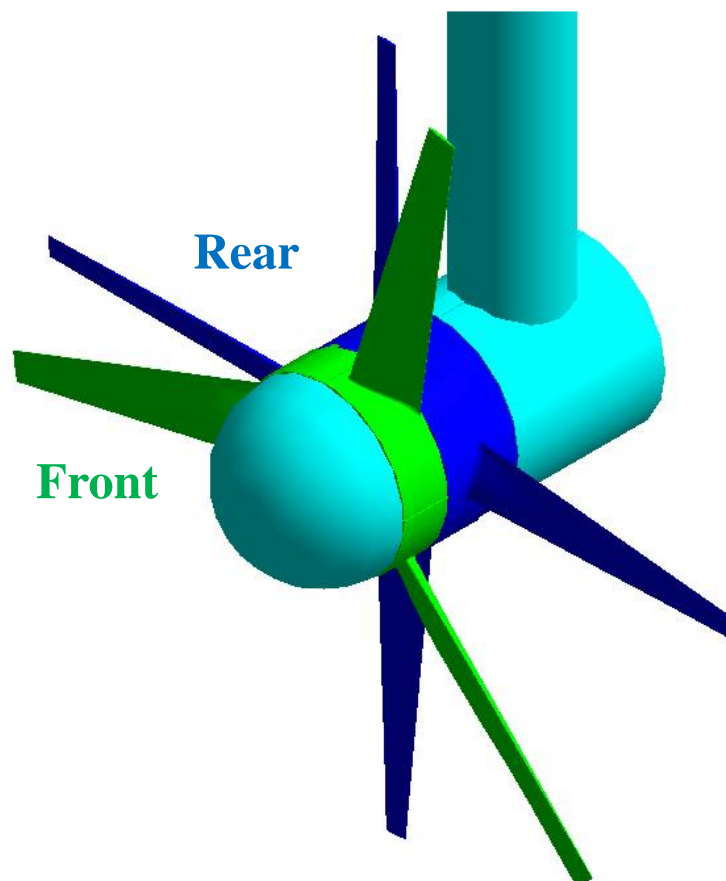


図 3.1 潮流発電の概略図[20]

図 3.2 には実際に作成されているタービン模型を示す。表 3.1 には、タービン模型から得られた結果をもとに最適化した二重反転タービンの主要項目がまとめられている。タービンの平面形状は、図 3.2 のタービン模型から幾何学的形状を参考に決定している。ピッチ分布は、翼根部が失速しやすいため、有効迎角が半径方向に一様になる翼端低通減型ピッチ分布としている。翼断面形状は図 3.2 の模型と同様な断面を用いたが、翼厚分布を変更している。

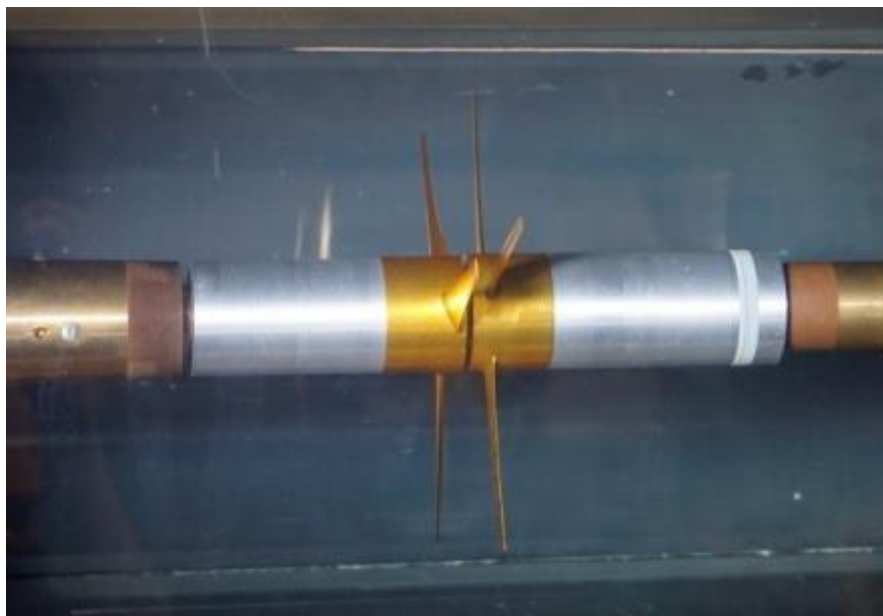


図 3.2 二重反転タービンの模型[11]

表 3.1 二重反転タービンの主要項目[11]

要目	前方タービン翼	後方タービン翼
	MTN03	MTN04
翼数	3	4
直径 [m]	0.2500	0.2500
ボス比	0.2381	0.2381
ピッチ比 (0.7R)	0.2795	0.2270
翼平面形状	台形	台形
ソリディティ	0.0568	0.0568
翼断面形状 (翼厚)	NACA63 系	NACA63 系
翼断面形状 (キャンバー)	NACA a=1.0 系	NACA a=1.0 系

前後タービンの発生トルクはそれぞれの回転数に比例する設計条件を満たす作動点を求めるため、様々な回転数比に対し回転数と前後タービンの発生トルク比が一致し、且つパワー係数が最も大きい条件を検討している。まず、異速反転時のタービン性能と等速反転時の性能を比べると、パワー係数 C_p がより大きくなり、最高点を与える周速比は大きくなることから、等速反転より異速反転のタービン性能が良くなることが分かっている。図 3.3 には例として回転数比 12:9、12:7 の場合について示されている。回転数比が 12:9 (実線) の時の周速比 Λ は 3.703 でパワー係数が 0.425, 12:7 (一点鎖線) の時の周速比は 3.773 でパワー係数が 0.415 であった。最終的に設計回転数比は 12:9 としている。

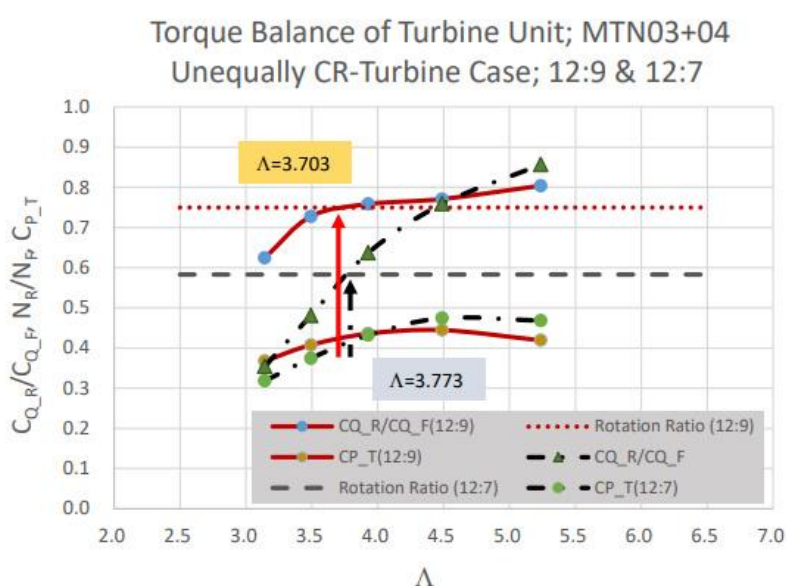


図 3.3 二重反転タービンの作動点[11]

図 3.4 と図 3.5 には、設計されたタービンへの各流入速度に対する作動点をプロットしたもの示す。その結果、流入速度が前述した条件である 2.5 m/s の時、タービンの回転数は前方タービンが 12.2 rpm となり、後方タービンが 9.1 rpm となる。その時の発電量は 516 kW となる。前方タービンはトルクが 251 kNm となり、後方タービンはトルクが 188 kNm となる。二重反転タービンの仕様について表 3.2 に示す。以降、本論文ではこの仕様を用いたタービン側のモデルを海技研モデルとする。

Torque Curves of Turbine Unit; MTN03+MTN04
Unequally Rotating CR-Turbine Case; 12:9

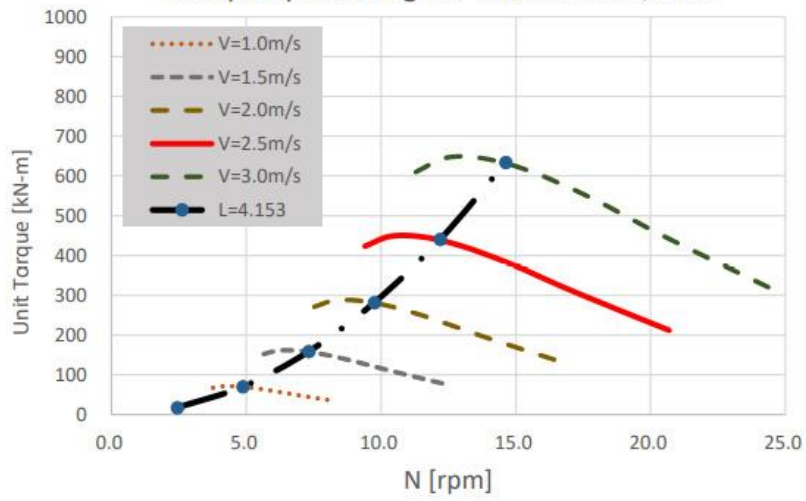


図 3.4 各流入速度の作動点でのトルク[11]

Power Curves of Turbine Unit; MTN03+MTN04
Unequally Rotating CR-Turbine Case; 12:9

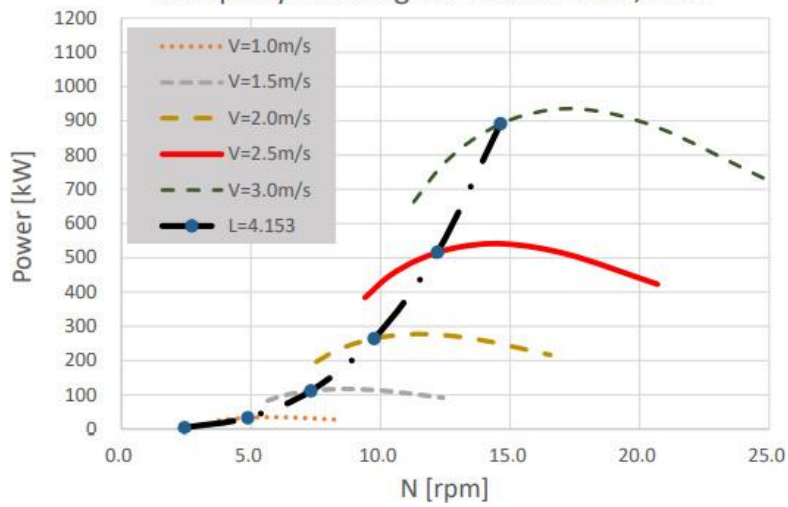


図 3.5 各流入速度の作動点での出力[11]

表 3.2 二重反転タービンの仕様(海技研モデル)[11]

流入流速 [m/s]	2.5
タービン直径 [m]	14.5
タービン翼の材質	アルミニウム青銅鋳物
前方タービン回転速度 [min^{-1}]	12.2
後方タービン回転速度 [min^{-1}]	9.14
前方タービントルク [kNm]	251
後方タービントルク [kNm]	188
タービン出力 [kW]	518

3.2 発電機側の概要

ここからは、前述した海上技術安全研究所の二重反転タービンの仕様をもとに研究を行った二重電機子バルク超電導同期機の仕様である。

図 3.6 は、本研究で作成した発電機部の基本モデルである。図 3.7 に潮流発電の二重反転タービンと発電機の結合部を表した断面図を示す。前方タービンと内側電機子が直接接合しており、後方タービンと外側電機子が直接接合している。外内の電機子の間にある黄色の部分超電導バルク磁石になっている。図 3.8 に発電機の界磁極として使用する超電導バルク磁石の配置図となっている。解析上では図 3.6 の超電導バルク磁石のモデルは 2 つで 1 組としているため、1 極 3 つの超電導バルク磁石が横に並んでいるモデルとなっている。1 極に対して使用する超電導バルク磁石は 60 個となり、 3×20 個での配置となっている。超電導バルク磁石の大きさについては、横 50 mm、縦 50 mm、高さ 20 mm となる。解析モデルでは、超電導バルク磁石間の幅は 1 mm で設計している。表 3.3 には、発電機の仕様について示した。ティースの磁化特性については、図 3.9 に示した。

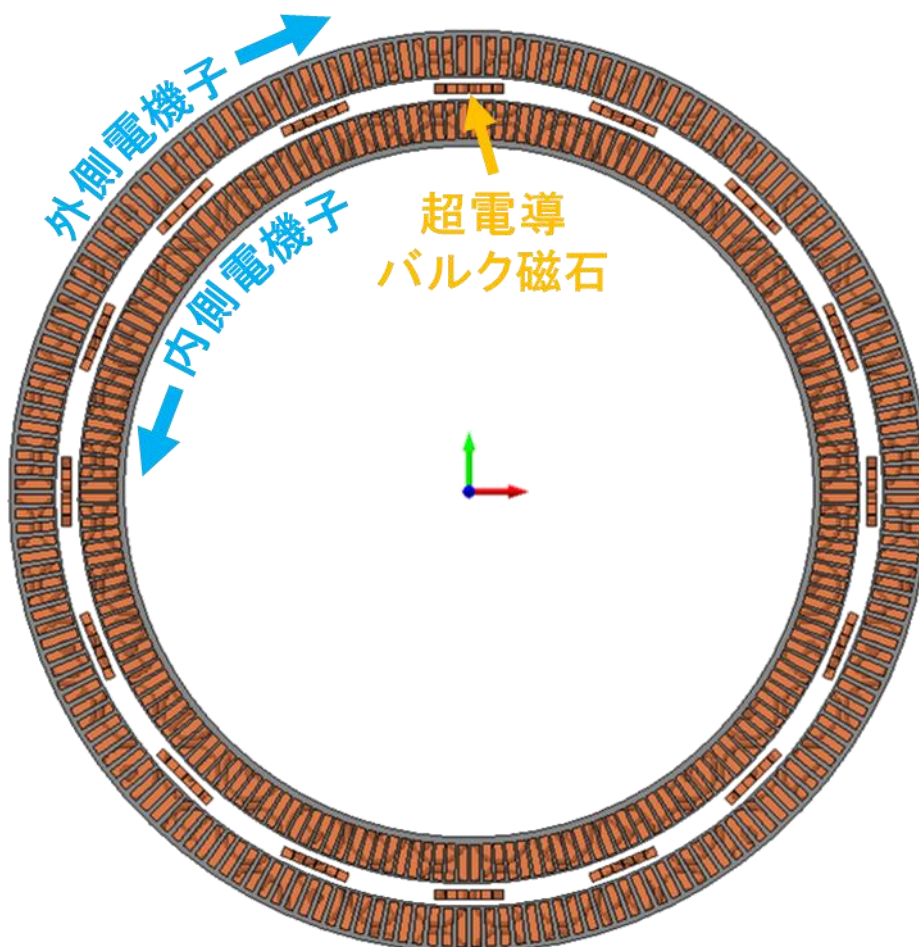


図 3.6 全体モデル

表 3.3 発電機の仕様

発電機直径 [m]	2
電機子の厚さ [m]	0.1
回転子	電機子巻線 (銅線)
固定子	超電導バルク磁石 ($\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-z}$)
超電導バルク磁石の大きさ [mm]	50×50×20
超電導バルク磁石の個数	960
極数	16

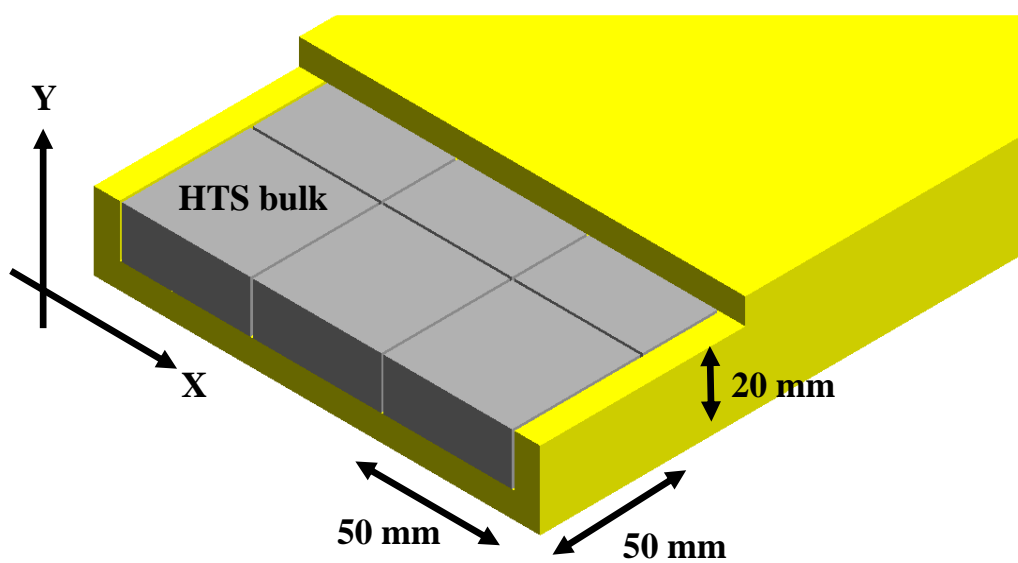


図 3.8 超電導バルク磁石の配置図[20]

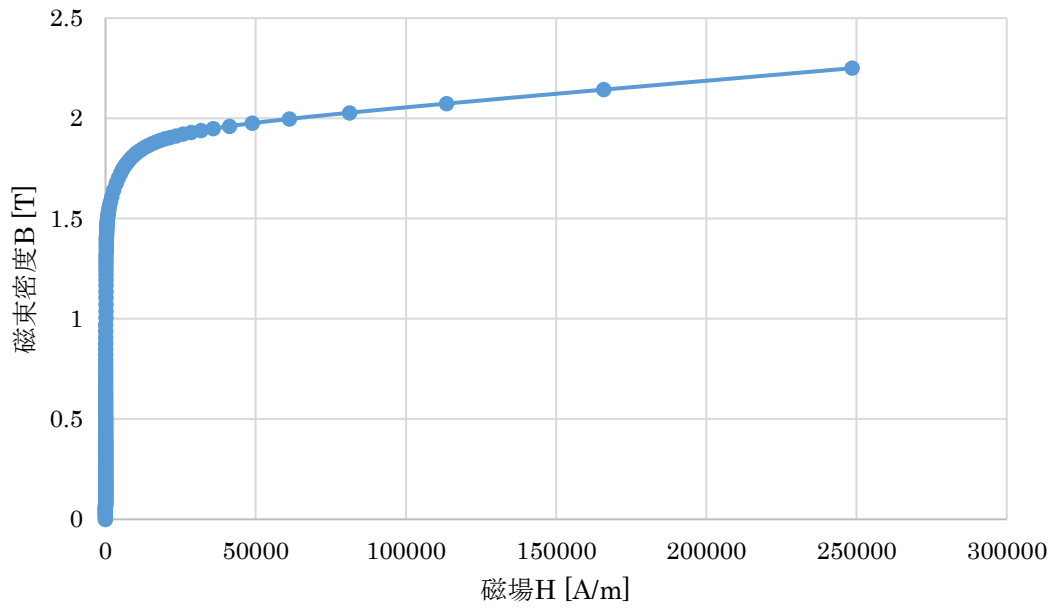


図 3.9 M600-50A の磁化特性[5]

第4章 潮流発電と二重電機子バルク超電導同期機の適応性の検証

本研究では、磁場解析ソフト MagNet(Version7)を用いてシミュレーション解析を行った。MagNet は、カナダの Infolytica 社で開発されており、国内外の研究機関や企業で幅広く活用されている磁場解析専用ソフトウェアである。MagNet の特徴として、精度が高く速度の速い Maxwell 方程式の有限要素技術を使用しているため、電磁デバイスおよび電気機械デバイスのモデル化と性能評価を迅速に行うことができることがあげられる。

解析においては、CAD で作成したモデルを MagNet にインポートし、MagNet で材料指定、コイル指定、モーション(回転部分、回転速度、回転方向等)指定、メッシュ指定等を行う。

4.1 タービン側トルクとのトルクマッチング

はじめに、タービン側トルクとのトルクマッチングについて検証を行い、潮流発電と二重電機子バルク超電導同期機の適応性を確認する。

本研究では、潮流発電のタービン側として海技研によって最適化された二重反転タービン(海技研モデル)に発電機の外内電機子を直結させることで潮流発電の小型化を実現することを目指す。ここで、タービンと発電機を直結させるためには、トルクを一致させるトルクマッチングが必要となる。すなわち、二重反転タービンと直結させると発電機側の負荷トルクが大きくなり回転数も低減してしまうため、トルクマッチングを行うことによりタービン側で得られるトルクを低減させることなく発電機側に伝えることができるようになる。

4.1.1 電機子の選択

まず、トルクマッチングを行う前に、前方タービンおよび後方タービンそれぞれに直結させる外側または内側の電機子の組み合わせを決定する。表 3.2 よりタービン側のトルクは前方タービンが後方タービンよりも大きい値を示しているため、発電機側もトルクの大きい電機子を確認し、前方タービンと直結させる電機子とする。また、前方タービンは後方タービンに比べて回転速度が速いため、内側・外側それぞれの電機子の回転速度も決定することができる。

電機子の選択の解析概要について説明する。図 4.1 に作成した二重電機子バルク超電導同期機のモデルを示した。図 4.1 のモデルは、全体モデルの 1/16 分割の一つで設計しこのモデルを基本モデルとした。モデルの作成には CAD で外形の設計を行い、材料等を磁場解析ソフトである MagNet を用いて設定を行った。解析結果のトルクは、1/16 分割モデルの結果を全体モデルのトルクに変換した値となっている。

前方タービンと後方タービンに結合させる電機子をトルクの大きさにより選択するため

に、外内の電機子を等速で回転させる解析を行った。等速での解析によって発電機側の電機子の出力トルクの大小を確認し、各々のタービンと直結させる電機子を決定する。回転速度は 16 min^{-1} 、奥行きは 550 cm で解析を行った。

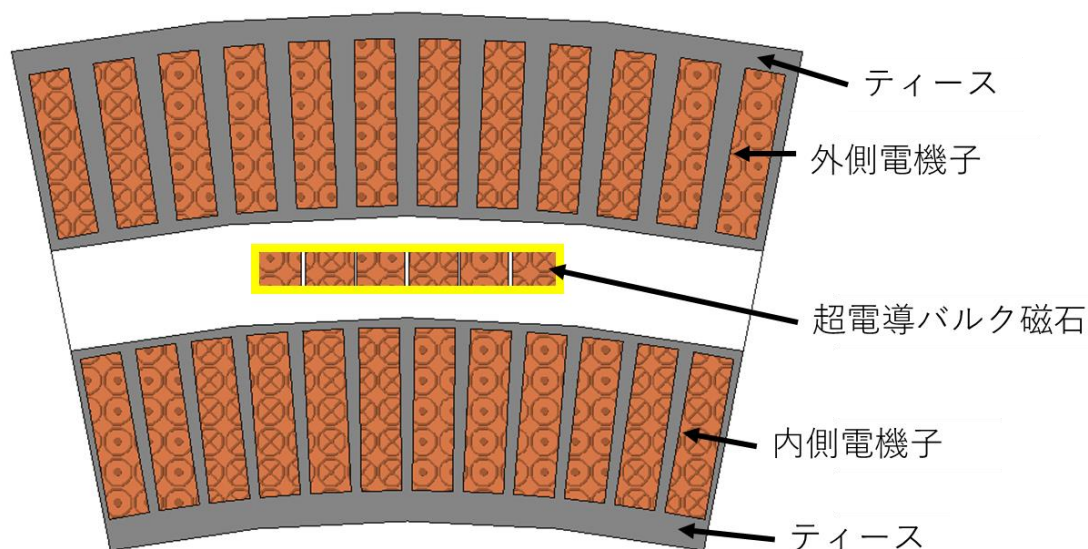


図 4.1 二重電機子バルク超電導同期機の 1/16 分割モデル (基本モデル) [20]

まず、外内電機子を等速で回転させた解析結果を表 4.1 に示した。解析結果より、外側電機子が 101 kNm 、内側電機子が 126 kNm となることが分かった。この結果より、前方タービンに内側電機子を直結し、後方タービンに外側電機子を直結するとトルクの大小関係を一致させることができる。加えて、タービンと直結するため内側電機子は前方タービンの回転速度である 12.2 min^{-1} で回転し、外側電機子を後方タービンの回転速度である 9.14 min^{-1} で回転させることが決定した。

結果より外側電機子より内側電機子が 25 kNm 大きい値となった。これは、磁束密度の収束が関係して内側電機子が外側電機子よりも高いトルクの値を示したと考えられる。電機子で発生するトルクは、体積、電気装荷、磁束密度の積で表される。ここで、電気装荷は同じ電機子電流を流しているため変化しない。体積に関しては、径の大きい外側電機子が内側電機子より大きい。以上から、内側電機子のトルクが高くなるためには、磁束密度が大きくなることが考えられる。そこで、y 軸方向のみで磁束密度を解析したところ、図 4.2 が得られた。図 4.2 は外内電機子の磁場の比較しやすいように、磁場範囲を $0\sim 10 \text{ T}$ で表示している。図 4.2 より、内側電機子が外側電機子より高磁場の広がり大きいことが分かる。これは、内側電機子の径が小さいため電機子巻線の間隔が狭くなり、磁束が収束しているからだと考えられる。そのため、内側電機子は外側電機子より高いトルクを得ることができた。

表 4.1 外内電機子の最大トルク [5]

	外側電機子	内側電機子
最大トルク [kNm]	101	126

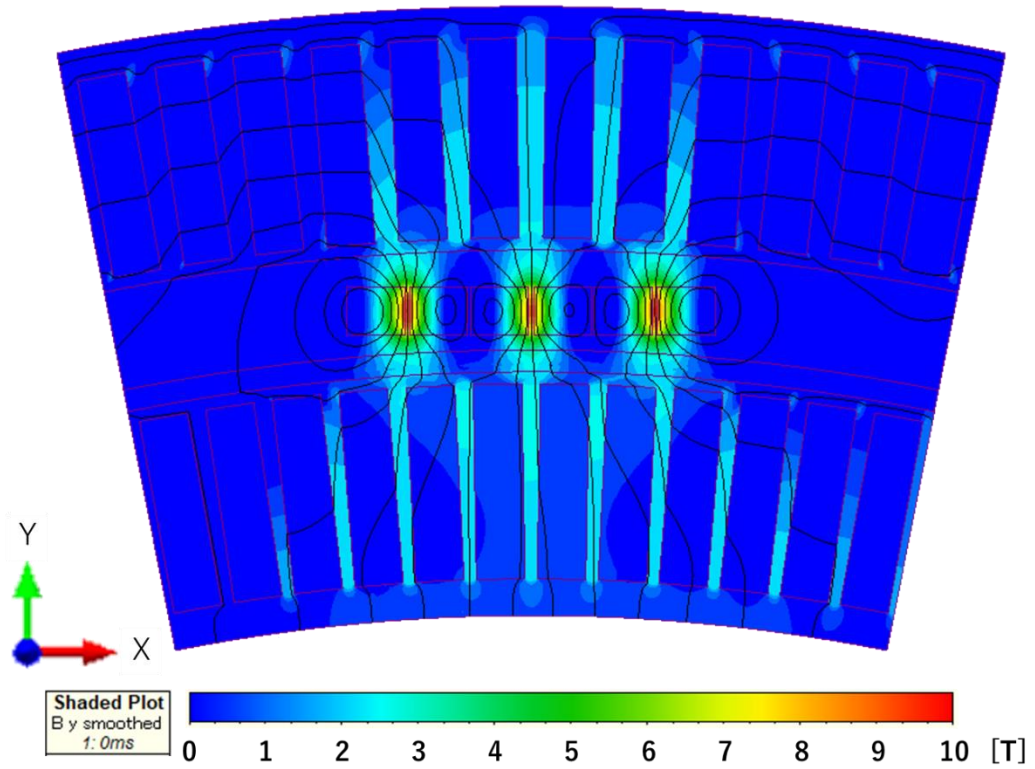


図 4.2 y 軸方向の磁束密度

4.1.2 解析概要

次に、電機子の選択で得られた結果から、内側電機子の回転速度は 12.2 min^{-1} 、外側電機子の回転速度は 9.14 min^{-1} で回転させ、この回転速度から海技研モデルのタービン側トルクの値と比率が一致するトルクマッチングが可能な発電機側の電気設計を行った。

本研究ではタービンと発電機を直結することを検討しているため、タービン側で発生するトルクよりも発電機側のトルクが低くなってしまうとその差が出力の損失分になってしまう。この損失を減らすために発電機側のトルクをタービン側のトルクに合わせる必要があるため、本研究でトルクマッチングを行った。

電気設計では、表 4.2 に示す回転速度以外の項目を検討した。特に超電導バルク磁石の着磁磁場に関しては、トルクに大きく影響するため着磁磁場の変更を主に行った。

表 4.2 電気設計指標

内側電機子の回転速度 [min^{-1}]	12.2
外側電機子の回転速度 [min^{-1}]	9.14
奥行き [m]	1
超電導バルク磁石間の距離 [mm]	1
中央のギャップ幅 [mm]	15
ティース	鋼 M600 - 50A
電機子電流密度 [A/cm^2]	63000
超電導バルク磁石の着磁磁場 [T]	6

4.1.3 結果と考察

トルクマッチングの解析概要で電気設計した項目を様々検討した結果を示す。まず、外内電機子を異速で回転させた磁場分布を図 4.3 に示す。超電導バルク磁石の着磁磁場は、使用した Gd 系のバルク材の現実的な着磁磁場等を検討した結果、トルクマッチングとして最も良い結果を与える着磁磁場は 6 T であることが分かった。超電導バルク磁石に 6 T 着磁することにより、電機子の超電導バルク磁石側表面に到達する磁場は約 2.5 T となり、この磁場による外内電機子のトルクが海技研モデルと良い一致を示す(表 4.3)。

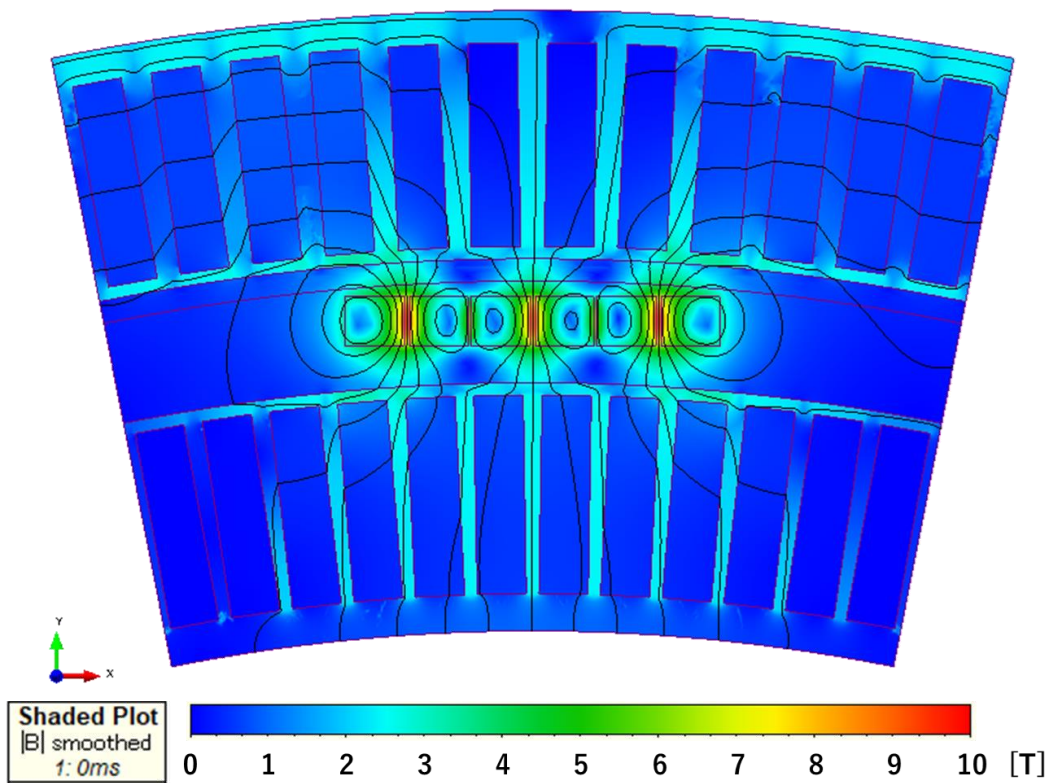


図 4.3 異速反転モデルの磁場分布[20]

次に出力結果について示す。図 4.4 には外側電機子トルクの時間変化について示し、図 4.5 には内側電機子トルクの時間変化について示した。グラフはそれぞれの電機子の 1 周分の回転に対するトルク時間変化を表している。内側電機子は 200 kNm を超えた値を示し、外側電機子は 150 kNm の前後を示している。また、トルクの脈動は外側電機子の方が大きいことが分かった。

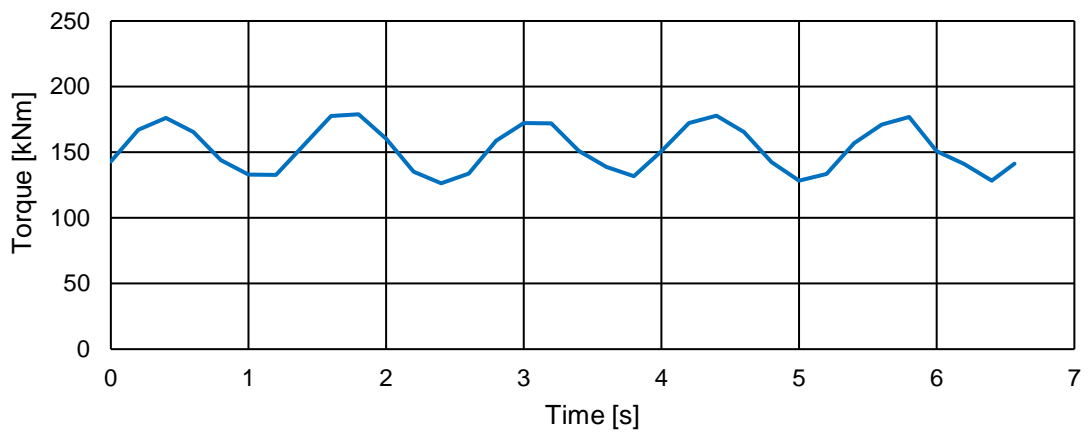


図 4.4 外側電機子トルクの時間変化

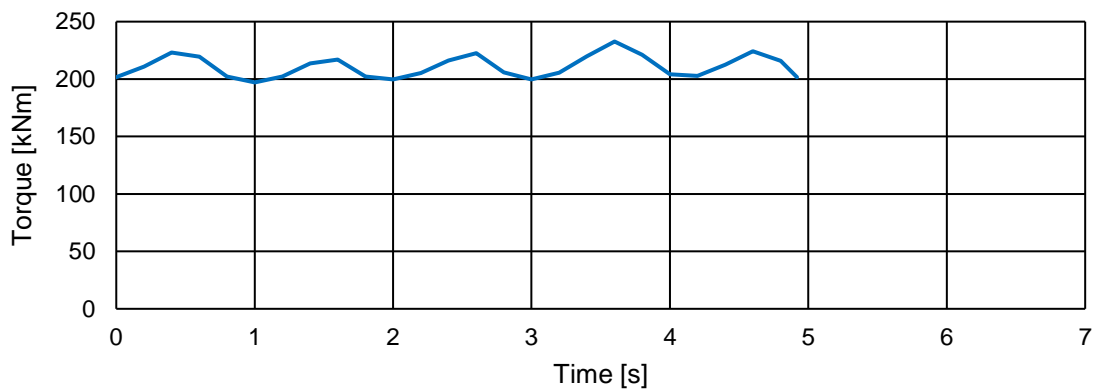


図 4.5 内側電機子トルクの時間変化

図 4.4 と図 4.5 のデータを表 4.3 にまとめ、タービン側のトルクと比較できるように示した。表 4.3 の最大出力は、最大トルクから式(4.1)を用いて算出した。ここで、 P は出力、 T はトルク、 N_s は同期速度を表している。

$$P = T \times \omega = T \times N_s \times \frac{2\pi}{60} \quad (4.1)$$

解析結果より、二重電機子バルク超電導同期機の外側電機子の最大トルクが 179 kNm、内側電機子の最大トルクが 233 kNm となった。外内電機子の最大出力は、約 470 kW が得られた。タービン側のトルクと比較すると、発電機側のトルクが少し低くなってしまったが、外内電機子のトルク比率も含めて両者は整合できたと結論できる。

表 4.3 タービン側と発電機側の出力結果の比較

	タービン側 (海技研)		発電機側	
	前方タービン	後方タービン	内側電機子	外側電機子
最大トルク [kNm]	251	188	233	179
最大出力 [kW]	518		469	

4.2 トルクリップルの低減

発電機側を一定速度で回転させるのに必要なトルクは時間的に変化し一定の値を示すのではなく(図4.4、図4.5)、ある値の前後を脈動するような結果となる。このようなトルクの脈動は一般的にトルクリップルと呼ばれ、タービン側からのトルクが発電に寄与せず、発電出力が低下する原因となるため可能な限り低減させる必要がある。ここでは、トルクリップルを可能な限り低減させる界磁極のデザインを検討した。

4.2.1 解析概要

先の解析において、外側電機子のトルクリップルが大きくなることが分かっている(図4.4、図4.5)。表4.4には、それぞれの電機子の最大トルクリップルの値を示した。この表より、外側電機子は52.6 kNm、内側電機子は33.0 kNmの最大トルクリップルがあることが分かる。

表 4.4 各電機子の最大トルクリップル

	外側電機子	内側電機子
最大トルクリップル [kNm]	52.6	33.0

表4.4から、この基本モデル(図4.1)では外側電機子の最大トルクリップルの値が課題点となることが分かった。外側電機子の最大トルクリップルは、最大トルクの約29%であり、その分の損失が発生することが予測できる。

本研究で使用した基本モデルでトルクリップルが大きくなってしまった原因として様々な要因が関係しているが、主な原因に超電導バルク磁石の磁場分布が関係していると考えられる。すなわち、超電導バルク磁石の磁場分布は図2.13に示した通り円錐状であるため、図4.6に示したように3つの超電導バルク磁石の磁場が平滑でなくジグザグな分布となっていることが原因であろうと推測される。ここでは、この磁場分布を変化させるような超電導バルク磁石の再配置を検討し、トルクリップルの低減が可能なのではないかと考えた。具体的には、界磁極の超電導バルク磁石の角度を変更することで磁場分布をジグザグ状から平滑化させることを行った。

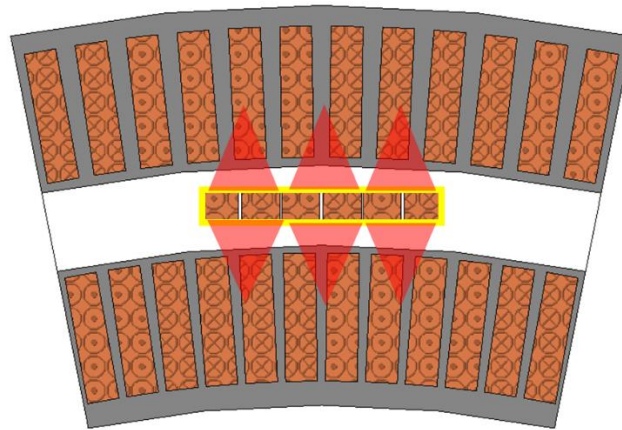


図 4.6 基本モデルの超電導バルク磁石の磁場分布

本研究のモデルでは、1極に超電導バルク磁石を横並びに3つ配置したため、界磁極の中にある超電導バルク磁石の配置を変更し比較した。モデルとして作成した配置を以下に記述し、図 4.7 に示した。モデルは1から5の5つ作成し、比較検討した。

(a) Model 1: 水平方向に3つ横並びで配置 (4.1 で使用した基本モデル)

先の解析で使用した基本モデルの超電導バルク磁石の配置として、本解析の比較対象となるモデルとした。

(b) Model 2: 電機子の曲線に合わせて円形に配置

電機子の形状に合わせて超電導バルク磁石を配置することにより、内側電機子に対して超電導バルク磁石の円錐状の磁場分布が内側に集まるように配置し、トルクがどのように変化するかを調べた。

(c) Model 3: Model 2 の配置を上下反転させて配置

このモデルでは、外側電機子の曲線によって両端の超電導バルク磁石との接触が起きてしまうため、中央のギャップ幅を Model 1 や Model 2 と異なり、内側電機子方向に 3 mm 移動させてから上下反転させて配置した。

Model 2 と上下反転にさせることで Model 2 とは反対に外側電機子に対して超電導バルク磁石の円錐状の磁場分布が外側に集まるように配置し、トルクがどのように変化するかを調べた。

(d) Model 4: Model 2 から3つ各々が超電導バルク磁石の中央から5度傾けて配置

超電導バルク磁石をジグザグにすることで、円錐状の磁場分布が内側に集まる状態と外側に集まる状態を1極の中に作り出して Model 2 と Model 3 に比べてどのように変化するかを調べた。

(e) Model 5: Model 4 の配置をもとにして偶数極で左右反転させて配置

Model 5 では、Model 4 をもとにして隣り合う極で面に対して鏡映移動しているような配置にすることで、Model 4 と比べてどのように変化するかを調べた。

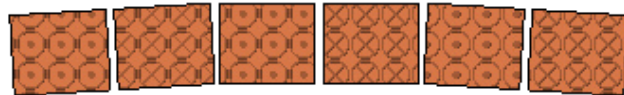
以上の5つのモデルを各々解析し、最適な超電導バルク磁石の配置を検討した。

Outer armature winding

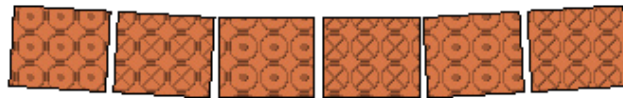


Inner armature winding

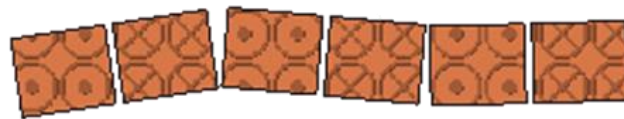
(a) Model 1



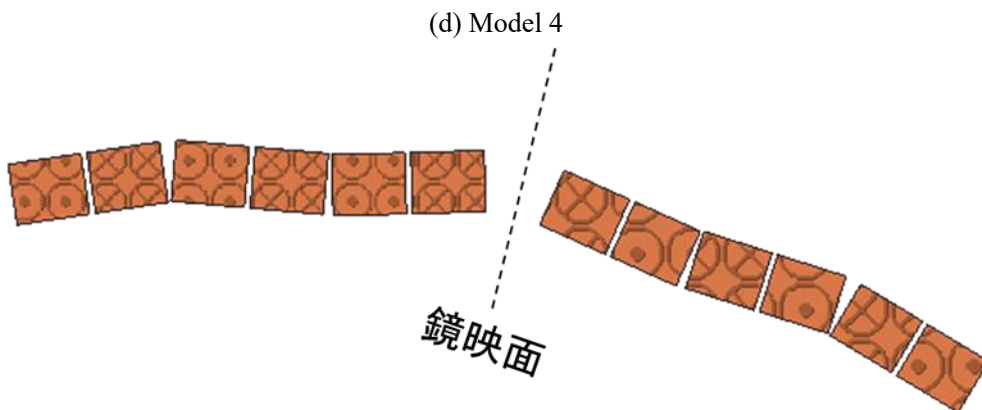
(b) Model 2



(c) Model 3



(d) Model 4



(e) Model 5

図 4.7 各モデルの超電導バルク磁石配置[20]

4.2.2 結果と考察

各モデルの外側電機子トルクの時間変化を図 4.8、内側電機子トルクの時間変化を図 4.9 に示す。グラフはそれぞれの電機子の 1 周分の回転に対するトルク時間変化を表している。外内電機子をそれぞれ 0~250 kNm の範囲で示したが、各モデル同士の変化量が小さいため大きな変化が見られなかった。

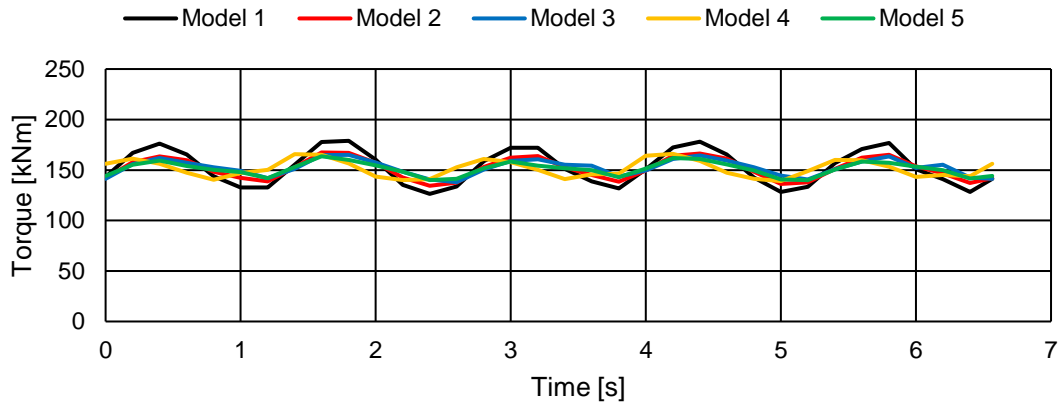


図 4.8 各モデルの外側電機子トルクの時間変化[20]

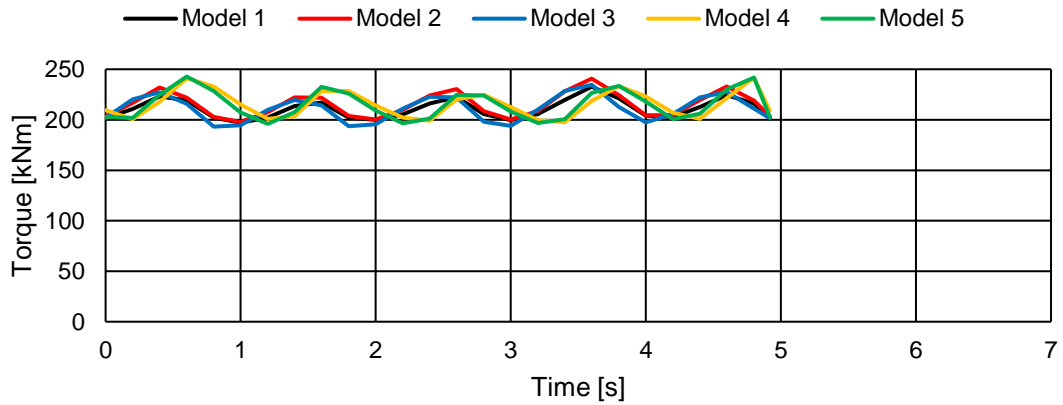


図 4.9 各モデルの内側電機子トルクの時間変化[20]

図 4.8、図 4.9 では、トルクの幅を大きくしており変化があまり見られなかったため、より変化が分かりやすくなるように、内側電機子では 150~250 kNm、外側電機子では 100~200 kNm の範囲で図 4.10、図 4.11 にそれぞれ示した。

図 4.10 より、外側電機子は Model 1 の最大トルクリップルが他のモデルと比べて大きくなるのが分かる。また、図 4.11 より、内側電機子は Model 5 の最大トルクリップルが他のモデルと比べて大きくなるのが分かった。

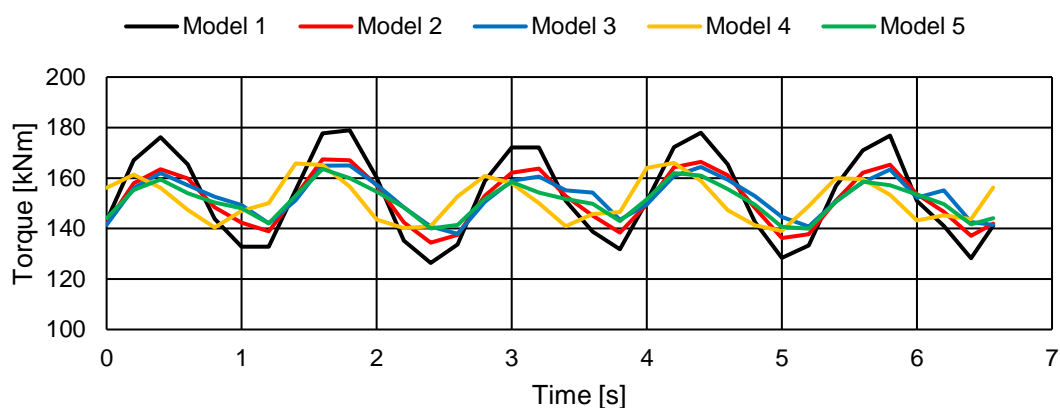


図 4.10 各モデルの外側電機子トルクの時間変化 (100~200 kNm)

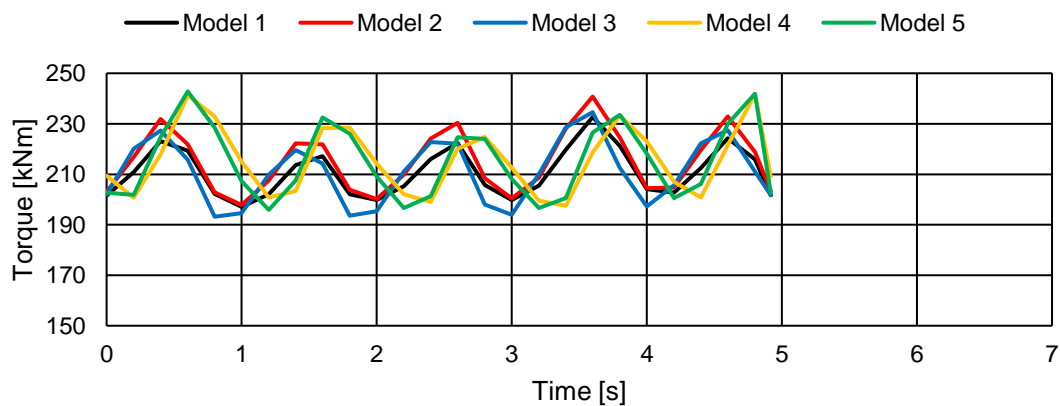


図 4.11 各モデルの内側電機子トルクの時間変化 (150~250 kNm)

図 4.8 のデータをもとに外側電機子の最大トルク、平均トルク、最大出力、平均出力、最大トルクリップルを算出して表 4.5 にまとめた。図 4.9 のデータをもとに内側電機子の最大トルク、平均トルク、最大出力、平均出力、最大トルクリップルを算出して表 4.6 にまとめた。

表 4.5 から分かるように外側電機子の最大トルクリップルは Model 1 が最も大きい値を示すが、Model 5 で最も小さくなった。一方、最大出力は、Model 1 が最も大きくなり、他のモデルはほとんど同じ値を示した。また、平均出力は、全てのモデルが 145 kW 付近の値を示した。したがって、Model 1 と比較するとそれ以外のモデルで出力を維持したままトルクリップルの低減ができたといえる。

表 4.6 から内側電機子の最大トルクリップルは、Model 1 が最も小さい値であることが分かる。しかし、外側電機子でのトルクリップルの差に比べ、Model 2、Model 3、Model 4 は大幅に大きくなることはなく 41 kNm 付近を示す値であった。最も大きな最大トルクリップルの値となったのは、Model 5 であった。

最大出力は Model 2、Model 4、Model 5 が大きい値を示したが、Model 1、Model 3 はそれらに比べて約 10 kW も低い値を示した。平均出力でも、Model 2、Model 4、Model 5 が大きな値を示し、Model 1、Model 3 はそれらに比べて約 5 kW も低い値を示した。

表 4.5 各モデルの外側電機子の出力

	外側電機子				
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
最大トルク [kNm]	179	167	165	166	164
最大出力 [kW]	171	160	158	159	157
平均トルク [kNm]	153	151	152	152	151
平均出力 [kW]	146	145	145	145	145
最大トルクリップル [kNm]	52.6	33.0	27.1	27.0	23.6

表 4.6 各モデルの内側電機子の出力

	内側電機子				
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
最大トルク [kNm]	233	241	235	242	243
最大出力 [kW]	298	308	300	309	310
平均トルク [kNm]	211	215	211	216	215
平均出力 [kW]	270	275	270	276	275
最大トルクリップル [kNm]	33.0	40.4	40.6	41.0	46.9

次に、トルクリップルが低減した要因について考察を行った。ここでは、超電導バルク磁石の配置を変更したことによる磁束密度分布シミュレーションの比較を行う。なぜなら、磁束密度の大きさはトルクの大きさと関係し、磁束密度の変化の幅と距離に対する変化の割合がトルクリップルと関係するからである。磁束密度分布を計算した位置は、外側電機子と内側電機子の界磁側表面とし、磁束密度分布は y 軸方向のみを計算した。Model 4 と Model 5 は Model 2 と Model 3 を組み合わせた配置であるため、ここでは基本となる Model 1～Model 3 のみの計算結果を示す。

図 4.12 に x 軸として界磁極に対する外側電機子の中心からの距離を、 y 軸として磁束密度の大きさをとったグラフを示す。Model 1 と Model 2 を比較すると、Model 2 は $x = \pm 0.05$ m における磁束密度が Model 1 より低いことが分かる。これは、円形配置(Model 2)では水平配置(Model 1)よりも両端の超電導バルク磁石が外側電機子から遠いため、磁束密度が小さいと考えられる。

Model 1 と Model 3 を比較すると、Model 3 は全体的に磁束密度が小さくなる。これは、Model 3 の界磁の中心と外側電機子との距離が Model 1 よりも 3 mm 離れている配置であることや、両端の超電導バルク磁石を外側に傾けると外側電機子までの距離が長くなるため磁束密度が上がらないことが原因であると考えられる。また、 $x = \pm 0.025$ m 付近で、Model 3 が Model 1 と比べて大きな磁束密度の値を示していることから、磁束を中央に集中させたことで磁束密度の増加が起きていると推測できる。すなわち、当初の見込み通り、磁石の向きを変化させて磁束密度分布の広がりを抑えることで、これを平滑化し、その結果としてトルクリップルを低減できたと考えられる。

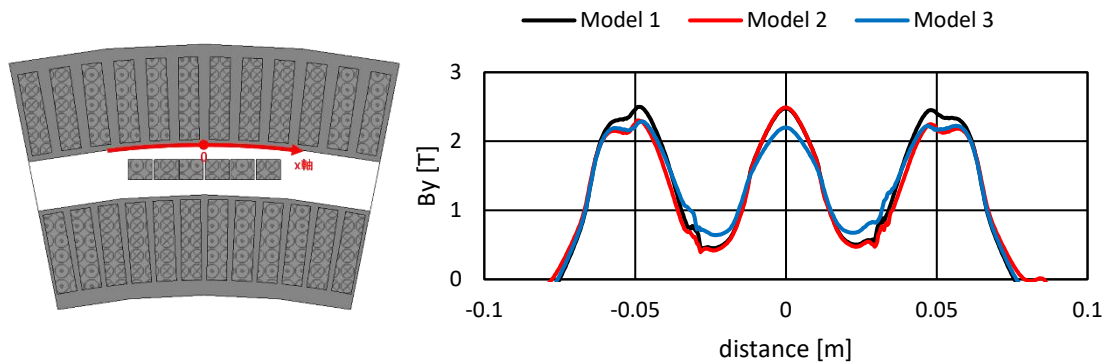


図 4.12 Model 1,2,3 の外側電機子の内側表面の磁束密度

図 4.13 に x 軸として界磁極に対する内側電機子の中心からの距離を、 y 軸として磁束密度の大きさをとったグラフを示す。Model 1 と Model 2 を比較すると、Model 2 は $x = \pm 0.05$ m における磁束密度が Model 1 より大きいことが分かる。これは円形配置では水平配置よりも両端の超電導バルク磁石が内側電機子に近くなり、磁束密度が大きくなるためと考えられる。

前述した表 4.6 において、Model 1 と Model 3 を比較すると、Model 3 の内側電機子では出力は変化しないがトルクリップルが大きくなっている。その原因について検討する。図 4.14 は y 軸の磁束密度を等磁力線であらわした磁束密度分布図である。各モデルの赤い線は全て同じ磁束密度(0.615 T)を示している。

図 4.14 において、Model 1,2 では 3 つの超電導バルク磁石の磁束密度が均一化されて電機子に到達しているのに対し、Model 3 では磁束密度が分散して内側電機子に到達している。 $x = \pm 0.025$ m 付近で Model 1 と比べて小さい値を示しているのは、磁束密度が内側に集まらずそれぞれ分散しているため超電導バルク磁石間の磁束密度が小さくなっていることが原因である。分散した理由については、Model 3 の配置では、内側に行くほど、磁束密度分布が広がっていき、より分散が強くなるためと考えられる。また、0 m で磁束密度が高くなったのは、Model 3 の超電導バルク磁石が Model 1 よりも内側電機子に 3 mm 近づいている配置であることや、Model 3 の配置では磁束密度が平均化されずに分散したためと考えられる。これらの原因により、Model 3 での内側電機子のトルクリップルが増大すると考える。

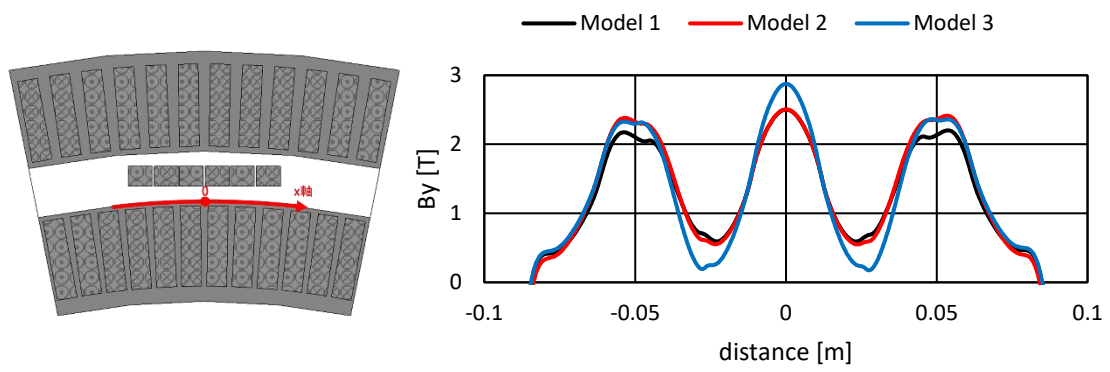
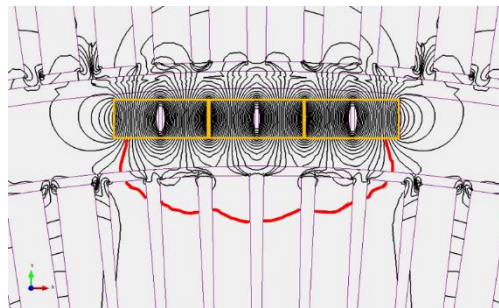
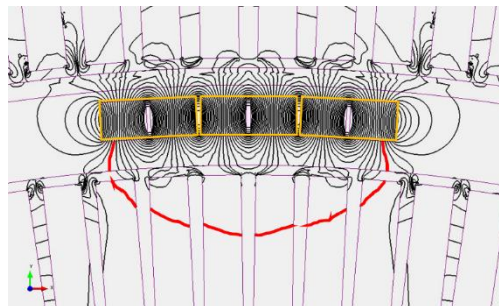


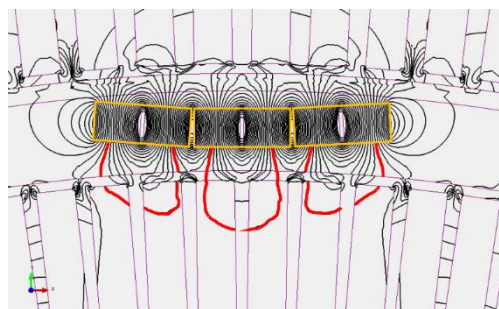
図 4.13 Model 1,2,3 の内側電機子の外側表面の磁束密度



(a) Model 1



(b) Model 2



(c) Model 3

図 4.14 Model 1,2,3 の等磁力線

Model 4 や Model 5 は、外側電機子のトルクリップルが低減できた Model 3 の配置と Model 3 の内側電機子の磁束密度の分散によるトルクの低下を低減できる Model 2 の配置を組み合わせた配置となるため、配置として最適となると考えられる。

表 4.5 と表 4.6 の結果を各モデルの外内電機子を合計したものを表 4.7 に示した。表 4.7 から外内電機子全体の最大出力は、Model 4 が最も大きくなった。最も小さい出力値となったのが Model 3 であった。平均出力では Model 1 と Model 3 のみが小さい出力値を示し、Model 2、Model 4、Model 5 は 420 kW 付近の出力値を示した。最大トルクリップルでは、Model 3、Model 4 が小さい値を示し、Model 1 が最も大きな値を示した。

表 4.7 各モデルの外内電機子の合計出力

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
最大トルク [kNm]	412	408	400	408	407
最大出力 [kW]	469	468	458	468	467
平均トルク [kNm]	364	366	363	368	366
平均出力 [kW]	416	420	415	421	420
最大トルクリップル [kNm]	85.6	73.4	67.7	68.0	70.5

4.2.3 トルクリップルを最小化するモデル

発電機設計において最も重要なパラメータは、平均出力と最大トルクリップルである。したがって、二重電機子バルク超電導同期機の界磁極に用いる超電導バルク磁石の配置で最も適していたのは Model 4 であることが確認できた。

表 4.8 は、最適な超電導バルク磁石の配置となった Model 4 と本研究の基本モデルである Model 1 とを平均出力、最大トルクリップルの比率で比較したものである。ここでは、Model 1 を 100 % とした場合の Model 4 の比率を表している。平均出力では、ほとんど変化なく Model 4 は 101 % となった。最大トルクリップルでは、Model 4 は Model 1 と比べ 79 % となった。このことから、Model 4 は Model 1 に比べ出力を維持したままトルクリップルを約 20 % も低減できる。

表 4.8 Model 1 と Model 4 の平均出力、最大トルクリップルの比率

	Model 1	Model 4
平均出力 [%]	100	101
最大トルクリップル [%]	100	79

第5章 二重電機子バルク超電導同期機の最適化モデル

本章では、これまでの解析で得られた結果から本研究で結論付けた二重電機子バルク超電導同期機の最適化モデルについてまとめる。

まず、発電機の内部構造を図 5.1 に示す。最適化モデルとして前章の Model 4 の磁石配置を界磁極に用いた。また、発電機の仕様を表 5.1 に示す。発電機の電機子には、電機子巻線に銅線、ティースに鋼の M600-50A を使用した。また、内側電機子を二重反転タービンの前方タービンに、外側電機子を後方タービンに直結させる。そのため、内側電機子を上流に対して反時計回りに 12.2 min^{-1} の回転速度で回転させ、外側電機子を上流に対して時計回りに 9.14 min^{-1} の回転速度で回転させる。界磁極には、Gd 系の超電導バルク磁石を用いて、1 極に 3×20 個で配置する。その界磁極を 16 極の構成として、回転させない固定子とした。界磁極に用いた超電導バルク磁石の着磁磁場は 6 T とした。

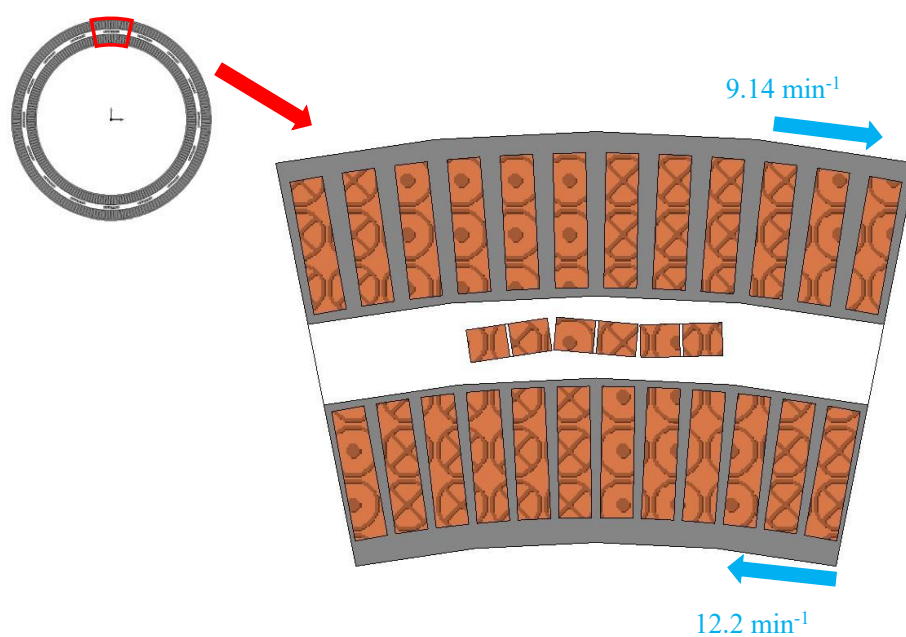


図 5.1 発電機の内部構造

表 5.1 発電機の仕様

発電機直径 [m]	2
電機子の厚さ [m]	0.1
回転子	電機子巻線 (銅線)
固定子	超電導バルク磁石 ($\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-z}$)
超電導バルク磁石の大きさ [mm]	$50 \times 50 \times 20$
超電導バルク磁石の個数	960
極数	16
内側電機子の回転速度 [min^{-1}]	12.2
外側電機子の回転速度 [min^{-1}]	9.14
奥行き [m]	1
超電導バルク磁石間の距離 [mm]	1
中央のギャップ幅 [mm]	15
ティース	鋼 M600 - 50A
電機子電流密度 [A/cm^2]	63000
超電導バルク磁石の着磁磁場 [T]	6

表 5.2 には、海技研によって最適化されているタービン側と本研究で最適化した発電機側を比較したものを示す。

最大トルクや最大出力は、タービン側と一致する結果が得られている。平均出力は 421 kW、トルクリップルは 68 kNm となる。

表 5.2 発電機とタービンの比較

	タービン側 (海技研)		発電機側	
	前方	後方	内側電機子	外側電機子
最大トルク [kNm]	251	188	242	166
最大出力 [kW]	518		468	
平均出力 [kW]	—		421	
最大トルクリップル [kNm]	—		68.0	

第6章 総括

世界規模でカーボンニュートラルを目指す動向が活発的になっていることから、温室効果ガスの大部分を占める二酸化炭素量の削減は極めて重要な問題である。多くの分野にて二酸化炭素量削減や環境への低負荷化は進められているが、エネルギー起源の二酸化炭素量削減には火力発電の利用を削減していく必要があるため、現状では解決することが容易ではない課題である。その解決策として海洋エネルギー発電の利用を多く進めていく必要があるように考えられる。特に海洋国である日本は、海洋エネルギー発電による再生可能エネルギー増加が見込める。しかし、海洋環境への影響を考慮して発電能力を向上させることは困難である。その中、タービン側で出力向上が可能になる二重反転タービン方式が開発された。発電機側も二重反転タービンに適用する形として相反転方式の発電機を開発したが、海流・潮流を利用する発電では、現場における修理が容易ではなく機械的信頼性に運用リスクがあると思われる。そこで、本研究においては、二重反タービン方式に適用する新たな発電機である二重電機子バルク超電導同期機を設計開発した。この研究では、二重電機子バルク超電導同期機が二重反転タービンと整合するかを検証し、トルクリップルが小さくタービン側の出力が低減しない界磁の配置法を提示した。

本研究で用いた超電導バルク磁石によって、発電能力向上と発電機の小型化を実現させることが可能になり、より海洋エネルギー発電の発展、日本での実用化を目指すきっかけになると考えられる。また、風力など多くのエネルギー分野で発電能力の向上、小型化が目指せる超電導バルク磁石の有用性についても明らかにした。

謝辞

本研究を行うにあたり、暖かいご助言をいただいた東京海洋大学名誉教授（現在独立行政法人国立高等専門学校機構鳥羽商船高等専門学校校長）の和泉充先生、東京海洋大学学術研究院海洋電子機械工学部門大貫等教授に深く感謝いたします。また、研究への的確なご指導や基礎的な技術・知識を辛抱強く教えていただいた学術研究院海洋資源エネルギー学部門井田徹哉教授、研究室で研究を共にした現在独立行政法人国立高等専門学校機構大島商船高等専門学校商船学科講師の山口康太博士、ナミビア大学工学・情報技術学部講師の Erasmus Shaanika 博士、本研究の解析にあたりタービン側の設計として共同研究いただいた国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所流体性能評価系の白石耕一郎主任研究員はじめ皆様の御指導に深く感謝申し上げます。

そして、本研究室にて共に研究を行っている村田一樹氏、森慶太郎氏、藤本隆正氏、前田有斗氏には研究するにあたり様々なご助言や協力を得たことに心より深く感謝いたします。

本研究は JSPS 科研費 JP16H04597 の助成を受けたものです。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 環境省, 脱炭素ポータル
https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/
- [2] 環境省, 2020年度の温室効果ガス排出量について
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/117187.pdf>
- [3] Guo X, Wu S, Fu W, Liu Y, Wang Y, Zeng P, *Energies*, 9, 517(2016).
- [4] 資源エネルギー庁 電力調査統計表 2020年度
- [5] 武井慎治, ”潮流発電への超電導バルク材の強磁場応用に関する研究”, 学士卒業論文 (2019年度)
- [6] 近藤俊郎 編著, 海洋エネルギー利用技術, (1996)
- [7] Clarke J A, Conner G, Grant A D, Johnstone C M, *Proc. IMechE 221 Part A: J. Power and Energy*, pp 171-9 (2007).
- [8] Huang B, Usui Y, Takaki K and Kanemoto T, *J. of Mech. Sci. and Technol.*, 30, 6pp (2014).
- [9] Nan D, Shigemitsu T, Zhao S and Ikebuchi T, *Renew. Energy*, 117, pp 184-192 (2018).
- [10] 海技研 工藤達郎
- [11] Ukon Y, Shiraishi K, Kudo T, Kanemaru T and Ando J, *Proceedings of Annual Spring Meeting of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 30, pp 289-92 (2020).
- [12] 九州電力グループ九電みらいエナジー, 再エネ発電
<https://www.q-mirai.co.jp/news/archives/243>
- [13] 三菱総合研究所, 超電導技術の将来展望
<https://www.mri.co.jp/knowledge/column/20180807.html>
- [14] 未踏科学技術協会超電導科学技術研究会 編著, これ一冊でわかる超電導実用技術, (2013)
- [15] A.C.ローズーインネス, 超電導入門, 産業図書株式会社, (1978)
- [16] 武田幸雄, 超電導テクノロジーABC, 成山堂書, (1991)
- [17] Shaanika E, Miki M, Bocquel C, Yamaguchi K, Felder B, Tsuzuki K, Ida T, Izumi M, Englebretson S, Chin R, Kolehmainen J, Morita M and Teshima H, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 30 no. 1, 6pp, Art no. 5200106 (2020)
- [18] Watasaki M, Izumi M, Miki M, Bocquel C, Shaanika E, Yamaguchi K, Ida T, Englebretson S, Chin R, Morita M and Teshima H, *Supercond. Sci. Technol.* 34 no. 3, 9pp, 035015 (2021).
- [19] Takei S, Izumi M, Yamaguchi K, Ida T and Shaanika E: “Double armature HTS bulk synchronous machine,” *Journal of Physics: Conference Series*, 1975, 6pp, 012034

(2021).

- [20] Takei S, Izumi M, Yamaguchi K, Ida T and Shaanika E: “Double armature HTS bulk synchronous machine for Contra-rotating Turbine Generator,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, 5201305 (2022).

List of Publication

- [1] Takei S, Izumi M, Yamaguchi K, Ida T and Shaanika E: “Double armature HTS bulk synchronous machine,” *Journal of Physics: Conference Series*, 1975, 6pp, 012034 (2021).
- [2] Takei S, Izumi M, Yamaguchi K, Ida T and Shaanika E: “Double armature HTS bulk synchronous machine for Contra-rotating Turbine Generator,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 32, 5201305 (2022).

List of Presentation

- [1] Takei S, Izumi M, Yamaguchi K, Ida T and Shaanika E: “Study on application of superconducting bulk material to strong electromagnetic field in tidal current power generation,” presented in 10th ACASC / 2nd Asian-ICMC / CSSJ Joint Conference, Okinawa, Japan, January (2020).
- [2] Takei S, Izumi M, Yamaguchi K, Ida T and Shaanika E: “Application of Superconducting Bulk Material to Marine Current Turbine,” presented in 99th CSSJ Conference, Japan, July (2020).
- [3] Takei S, Izumi M, Yamaguchi K, Ida T and Shaanika E: “Double armature HTS bulk synchronous machine,” presented in Applied Superconductivity, IEE Japan, Japan, October (2020).
- [4] Takei S, Izumi M, Yamaguchi K, Ida T and Shaanika E: “Double armature HTS bulk synchronous machine,” presented in The 33rd International Symposium on Superconductivity (ISS2020), Tsukuba, Japan, December (2020).
- [5] Takei S, Izumi M, Yamaguchi K, Ida T and Shaanika E: “Double armature HTS bulk synchronous machine,” presented in 100th CSSJ Conference, Kyoto, Japan, December (2020).
- [6] Takei S, Izumi M, Yamaguchi K, Ida T and Shaanika E: “Double armature HTS bulk synchronous machine,” presented in The 15th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2021), Moscow, Russian, September (2021).