

変動磁場生成システムおよび これを用いた磁気冷凍システム

自然科学研究機構 核融合科学研究所

ヘリカル研究部

装置工学・応用物理研究系

教授 平野 直樹

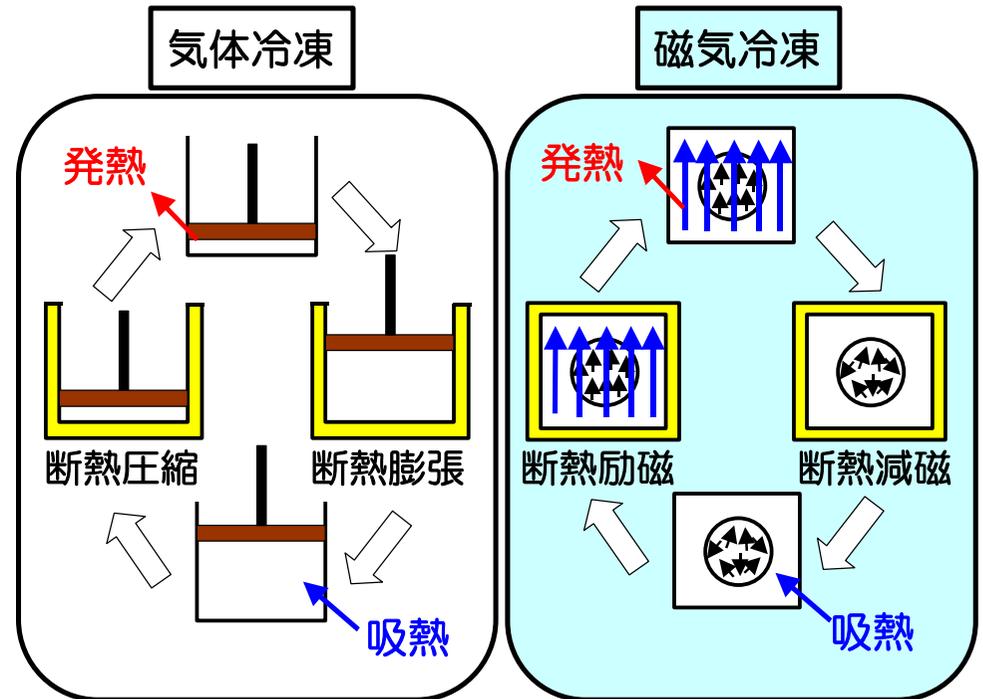
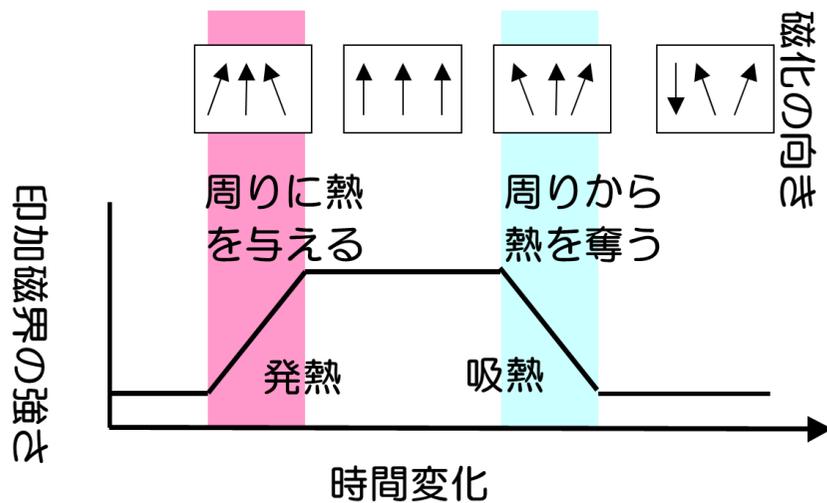
2023年2月9日

従来技術とその問題点

磁気冷凍とは

ある種の磁性材料に磁場変化を与えることで材料の温度が変化することを利用した冷凍技術。

理想的な冷凍サイクルを実現できることから、20K付近の温度域での高効率な冷凍機として期待されている。



従来技術とその問題点

磁気冷凍の特徴

- **環境にやさしい**

フロンに代わって磁性体の磁界変化による温度変化を利用

- **効率が高い**

気体冷凍技術：気体の圧縮膨張で損失発生

磁気冷凍技術：固体である磁性体の温度が一様かつ瞬時に変化



理想的な冷凍サイクルに近づけることが可能

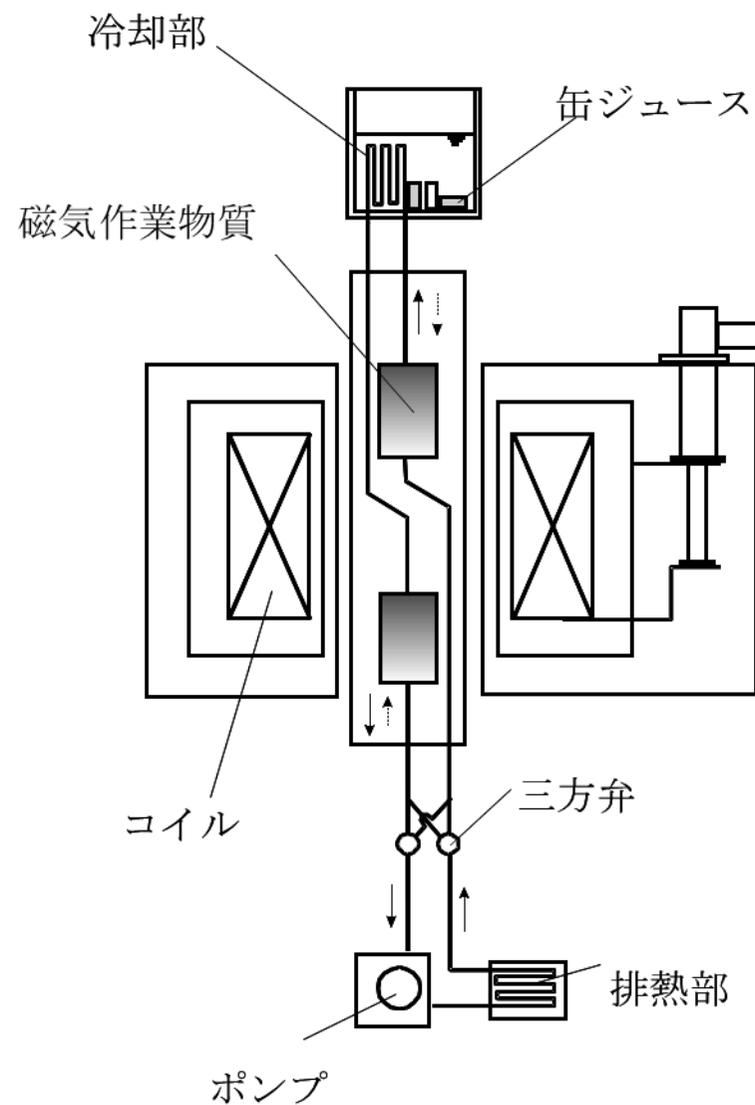
- **省エネが可能**

コンプレッサ不要

動力は熱交換媒体の循環と磁性体の移動に必要なだけ

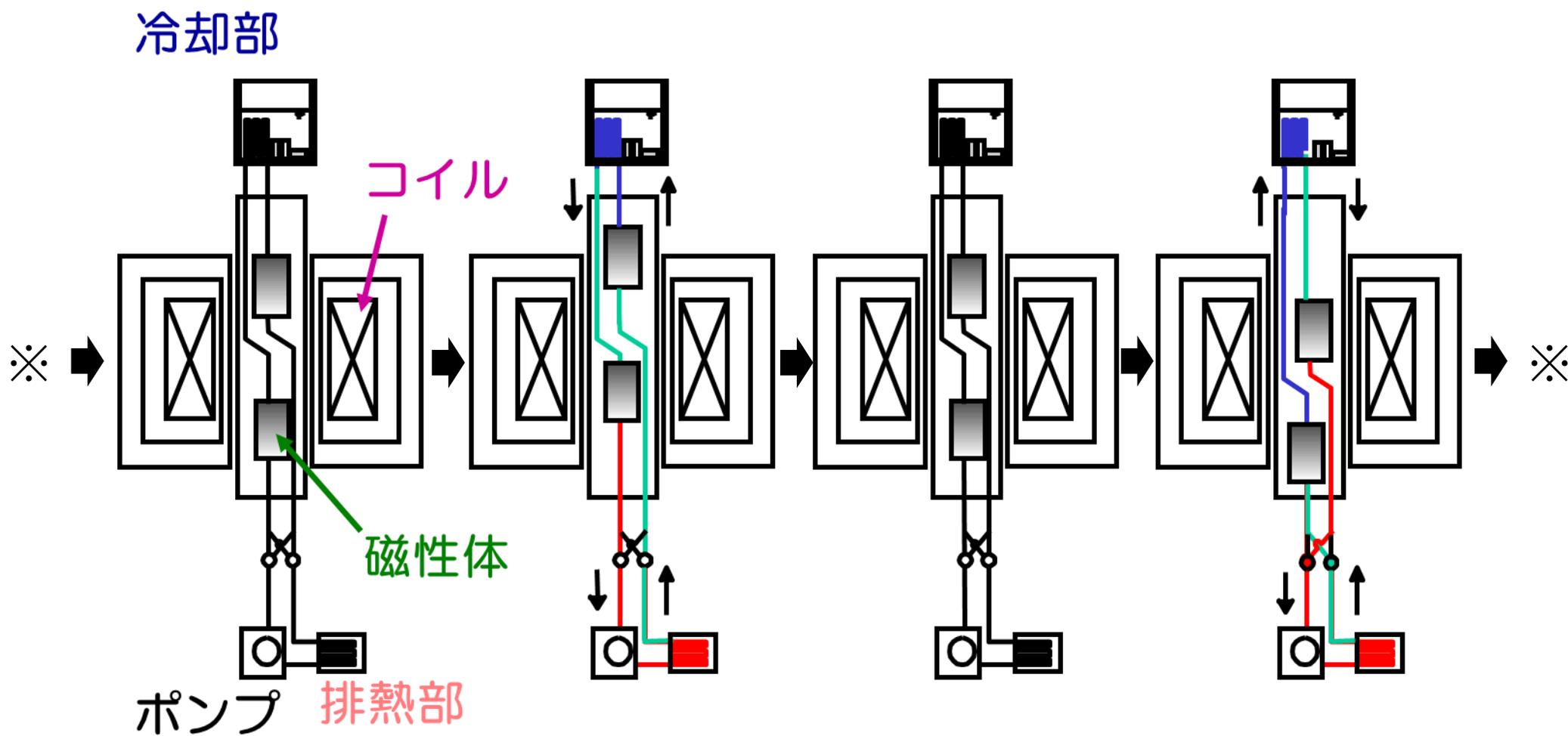
従来技術とその問題点

超電導を用いた室温磁気冷凍システム開発例



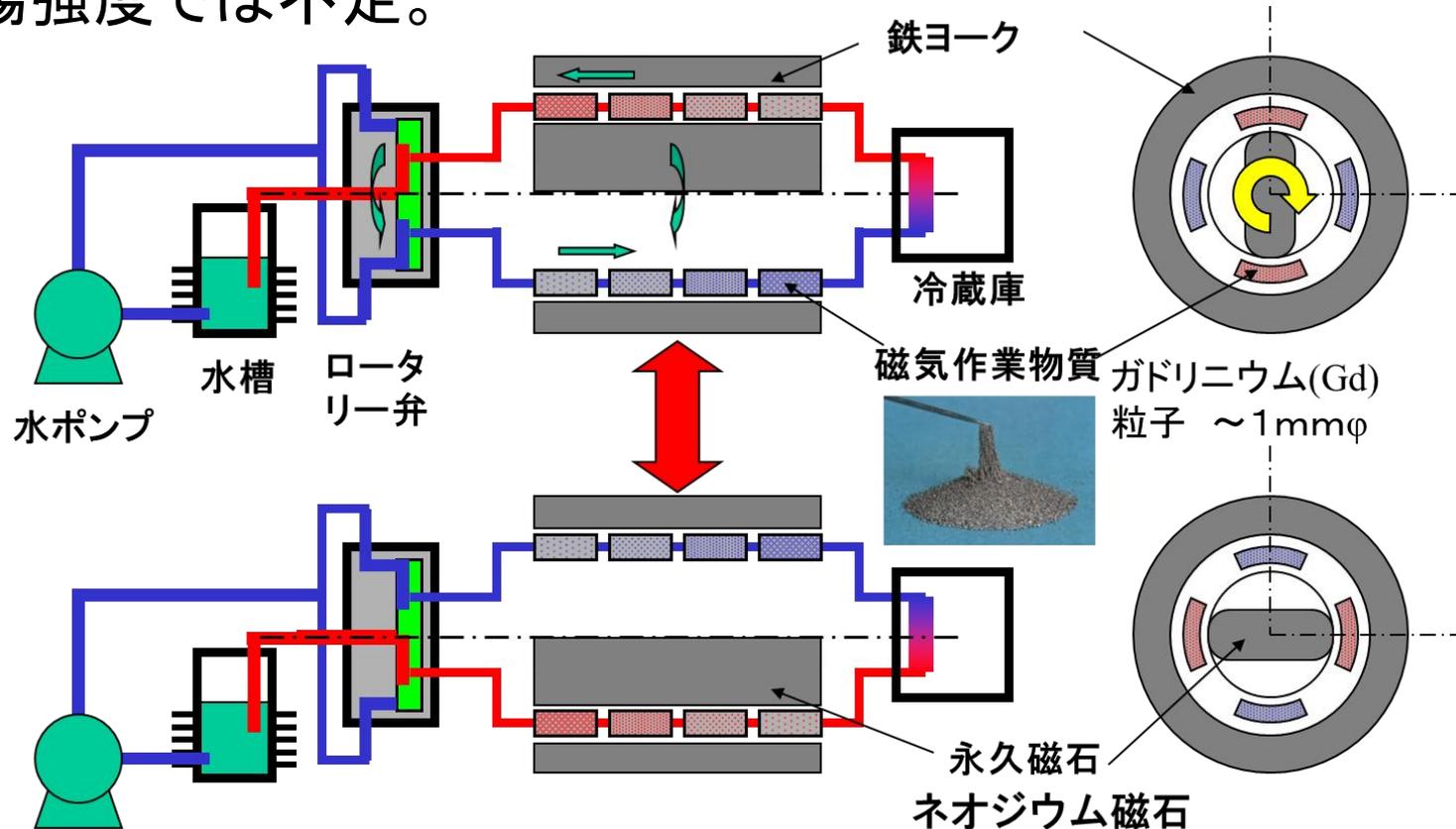
従来技術とその問題点

超電導を用いた室温磁気冷凍システム開発例



従来技術とその問題点

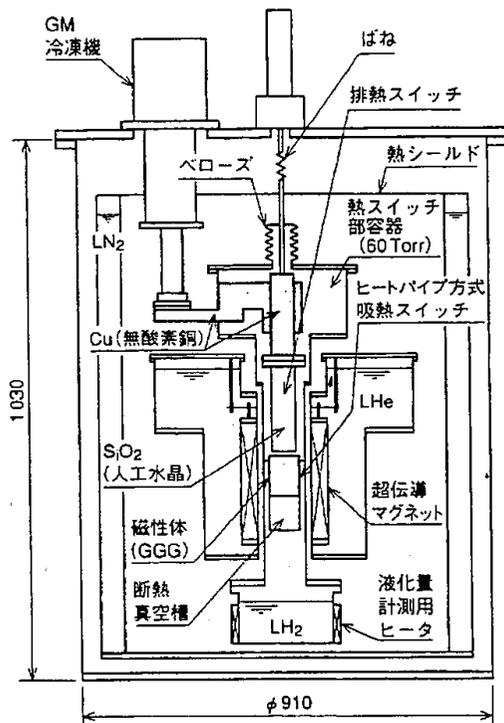
室温域での磁気冷凍応用では、永久磁石を用い、その磁石を回転させることで磁気作業物質に磁場変化を与える装置の開発が進められている。小規模で室温域の場合は永久磁石でも成立するが、大容量の冷却では永久磁石の磁場強度では不足。



永久磁石を用いた磁気冷凍機の構造例

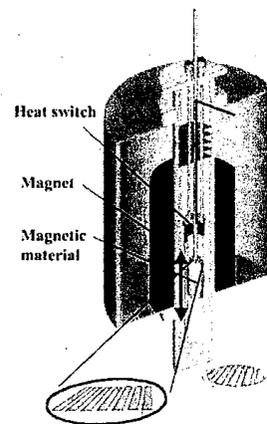
従来技術とその問題点

大規模でかつ低温域の磁気冷凍応用には、強力な磁場を省電力で発生できる超伝導コイル使用が不可欠



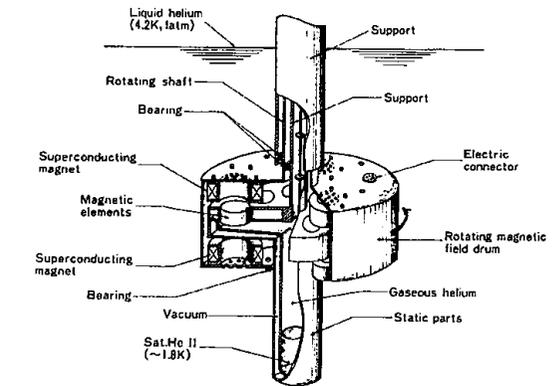
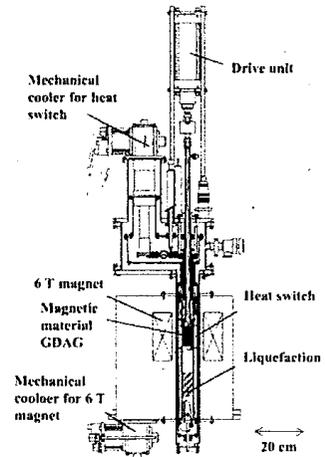
水素液化静止型磁気冷凍装置

超伝導磁石のON-OFFで磁界変化を発生
超伝導コイルの損失は考慮せず



水素液化磁気冷凍装置

磁性材料を超伝導磁石の中で上下に移動させる
駆動装置が大型になる

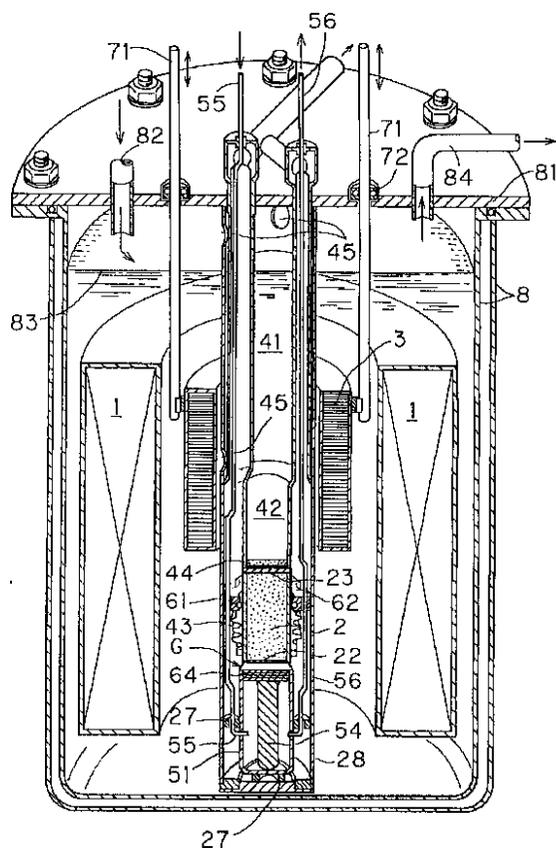


ヘリウム液化磁気冷凍装置

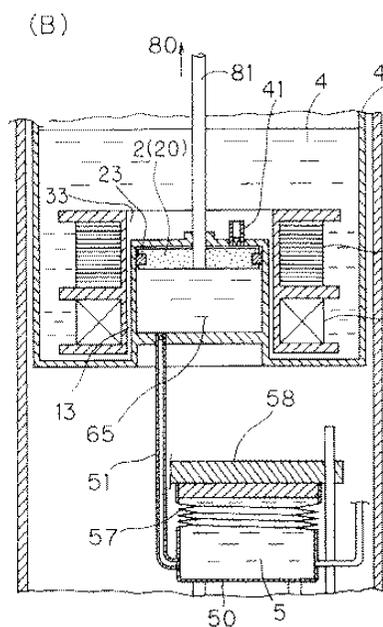
超伝導磁石が回転し、磁性体に磁場変化を与える
コイルへの給電方法に工夫が必要

従来技術とその問題点

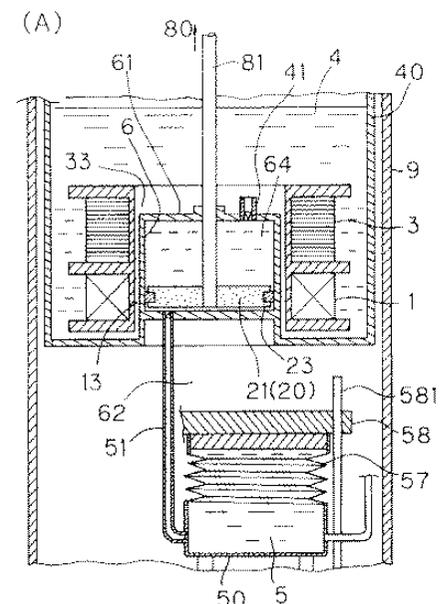
超伝導コイルと磁気遮蔽体の組合せによる磁気冷凍機も考案されている



特開平4-273956



特開平6-151983



従来技術とその問題点

磁気冷凍の課題

- 性能の高い材料の開発
- 材料の任意形状加工技術の確立
- **いかにして材料に磁場変化を与えるかのシステム開発**
従来は、
 - 材料を磁場中に出し入れする
 - 磁石を動かす
 - 電磁石をON-OFF

従来技術とその問題点

超伝導コイルを用いた磁気冷凍システムは、

- ・磁場変化を発生させる駆動力やコイル励磁電源などの付属機器を設置するための大きなスペースが必要

- ・消費電力も多く効率が低い 等

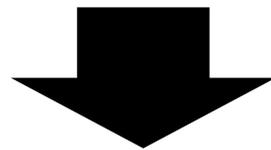
の理由で、いまだ実用化には至っていない。

新技術の特徴・従来技術との比較

超伝導コイルのエネルギー貯蔵を利用し、

外部からエネルギーを極力補てんすることなく複数のコイルの励磁・消磁を行う。

複数のコイルにより発生する磁場の組合せにより、磁気作業物質に磁場変化を与えることを特徴とした磁気冷凍機。



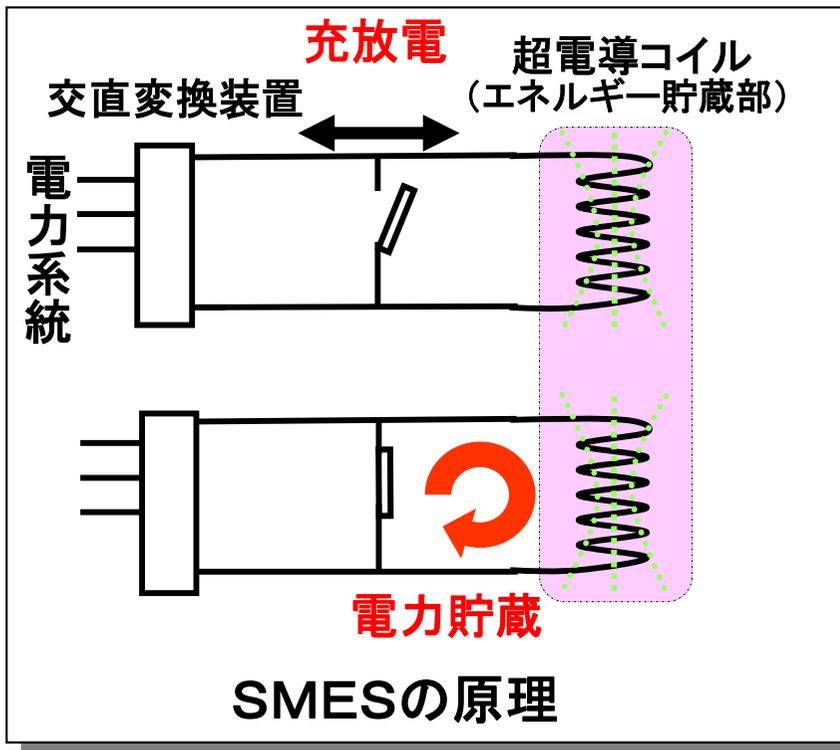
コイルの励消磁電源を大幅に簡略化でき、駆動系も不要なことからシステム全体がコンパクトとなる

超伝導コイルによるエネルギー貯蔵

- **SMES** (超伝導電力貯蔵装置)
: **S**uperconducting **M**agnetic **E**nergy **S**torage system

SMESの原理

超伝導の電気抵抗ゼロを利用して、超伝導線のコイルに電流を流しても電流が減衰することなく、一定の磁場を発生し続けるため、**電気エネルギーを磁気エネルギーとして貯蔵**することができる。



特長

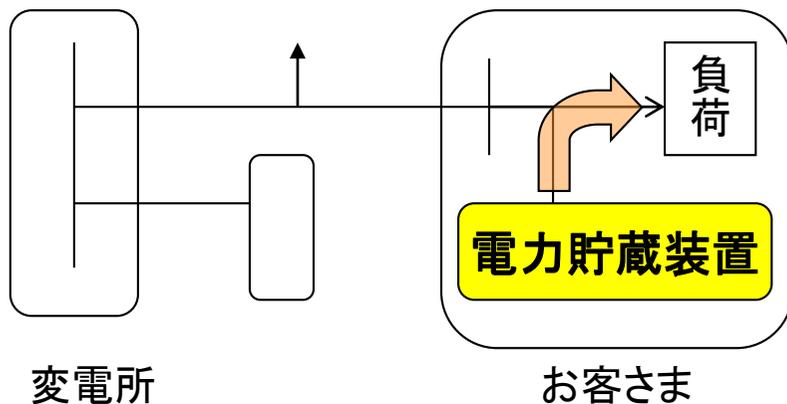
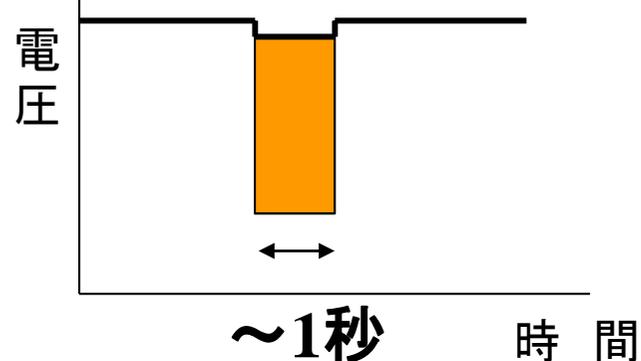
- ・貯蔵効率が高い
- ・エネルギー出入れ速度が速い
- ・繰り返し使用に強い

電力品質向上や電力ネットワークの安定化等に効果を発揮

超伝導コイルによるエネルギー貯蔵の実用例

電力品質向上(瞬低補償)

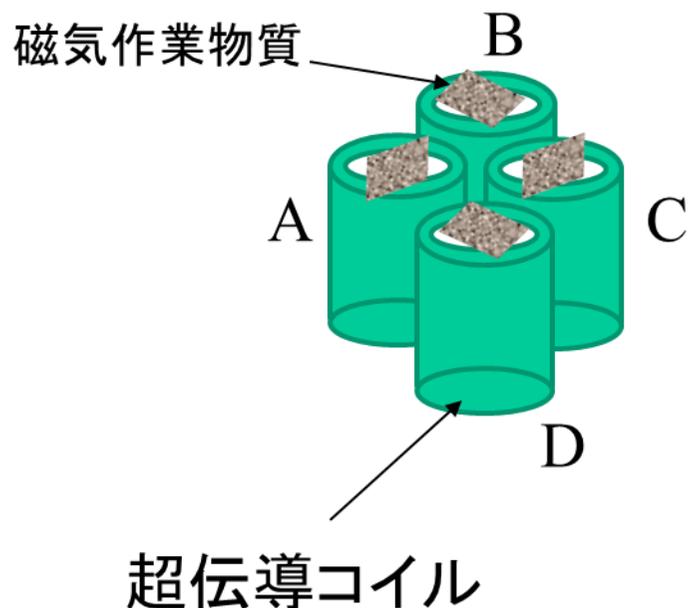
瞬時電圧低下によるお客さま
(半導体工場など)の損害低減



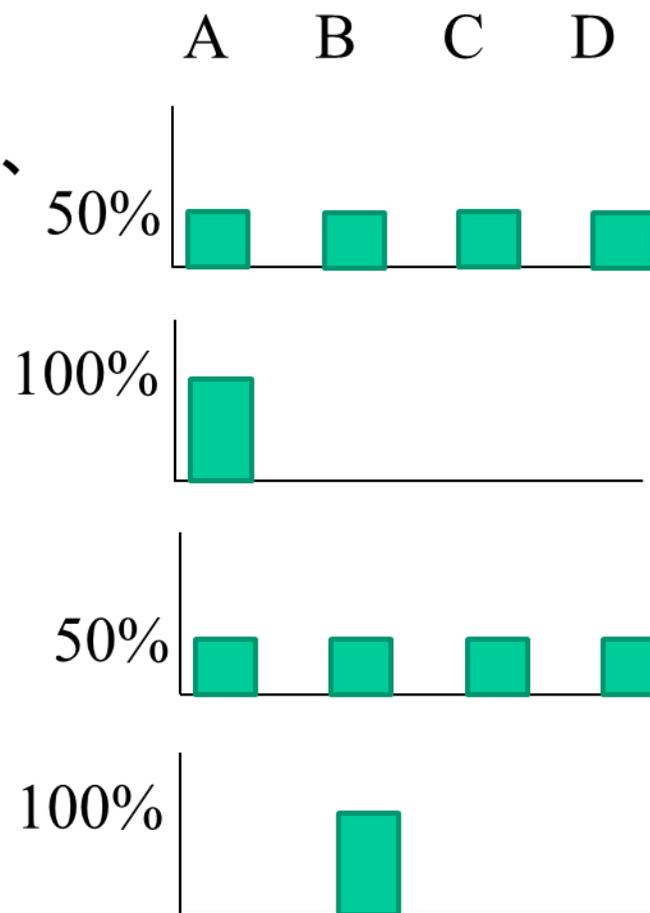
SMES



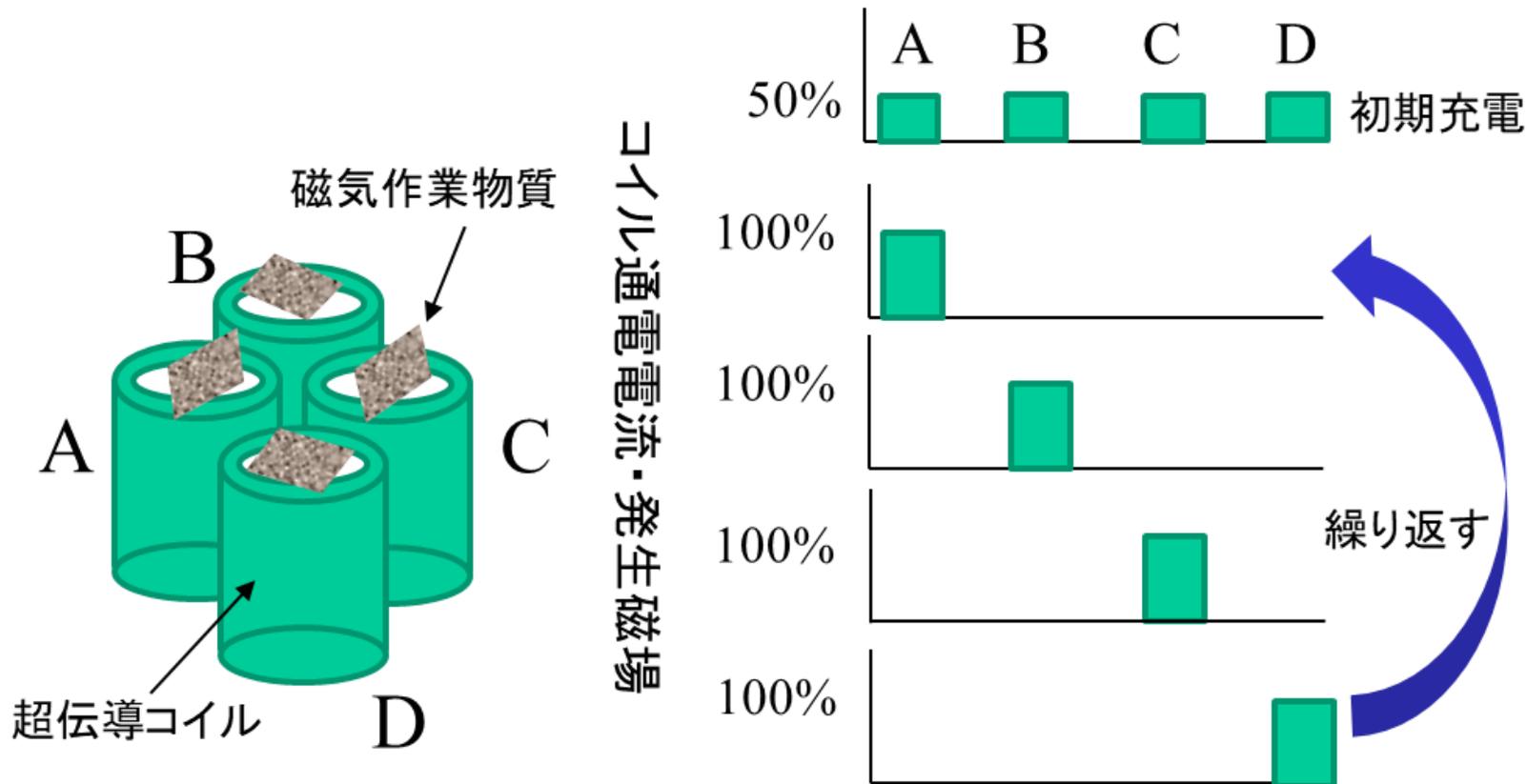
複数個の超伝導コイルを用い、超伝導コイルのエネルギー貯蔵特性を活用することで、外部との大きなエネルギーの出し入れの必要がなく、省エネルギーに磁場変化を繰り返し発生する機構



エネルギー、
発生磁場



複数個の超伝導コイルを用い、超伝導コイルのエネルギー貯蔵特性を活用することで、外部との大きなエネルギーの出し入れの必要がなく、省エネルギーに磁場変化を繰り返し発生する機構



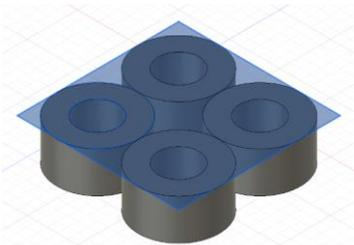
コイルの磁場分布解析



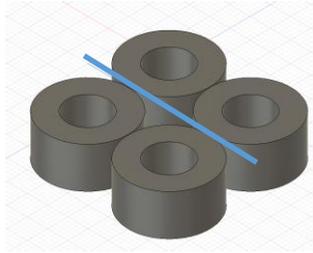
$$I_0, A+ B0 C0 D0, I_0, 1/2LI_0^2$$

解析条件:

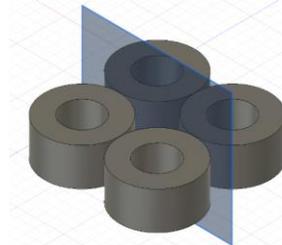
内径100mm, 外径200mm,
厚さ100mm, コイル間50mm
5000turn, 600A通電



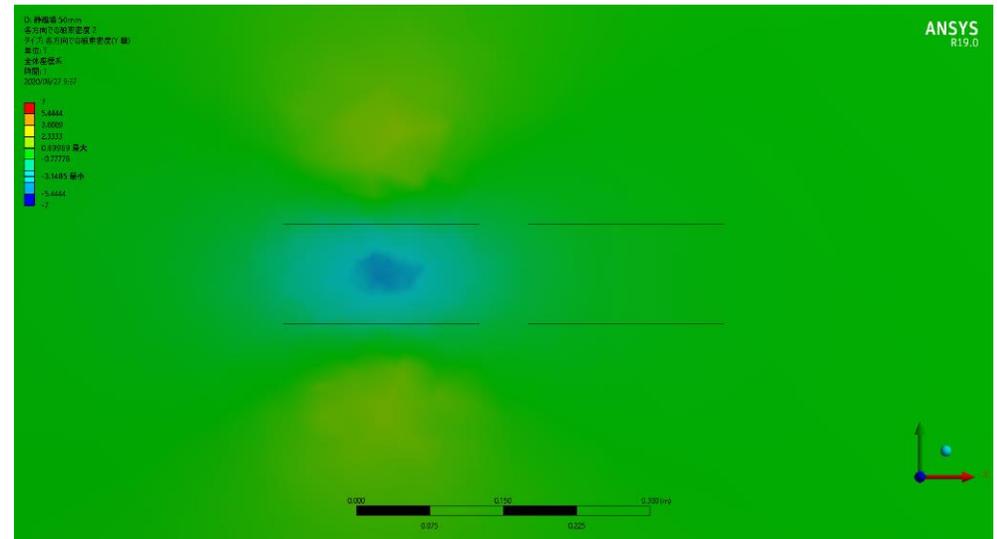
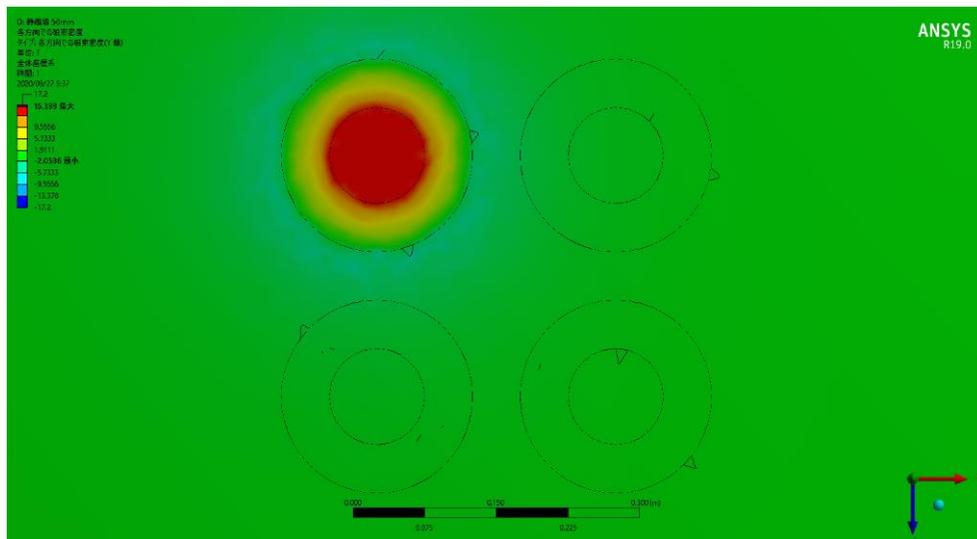
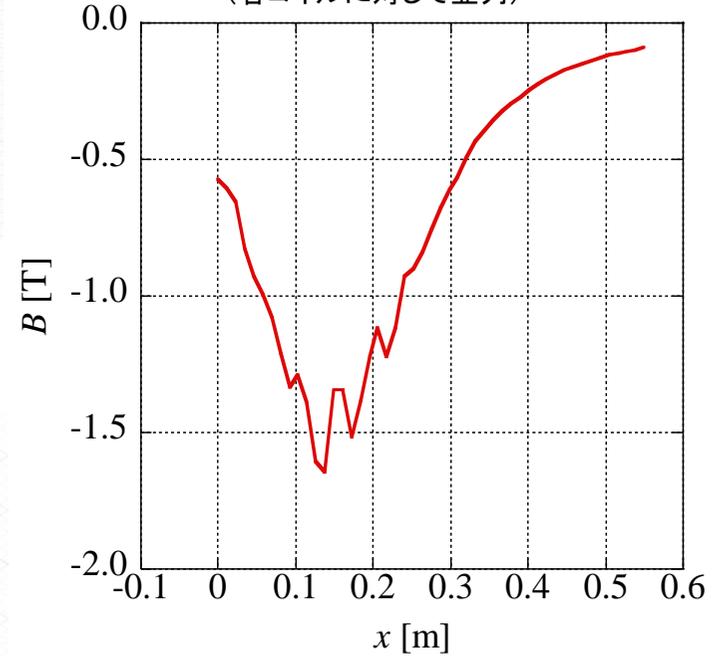
コイル電流値



各コイルに流す電流の向き



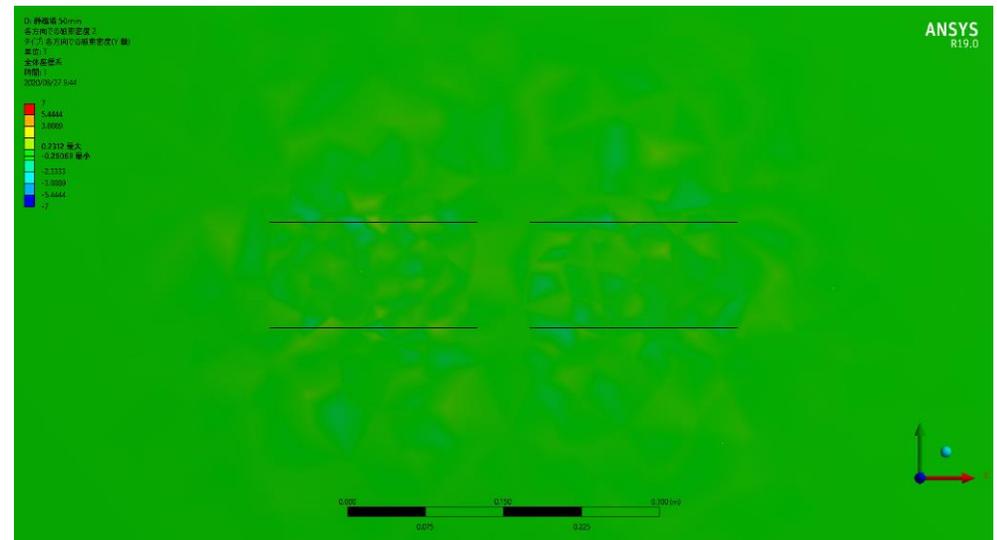
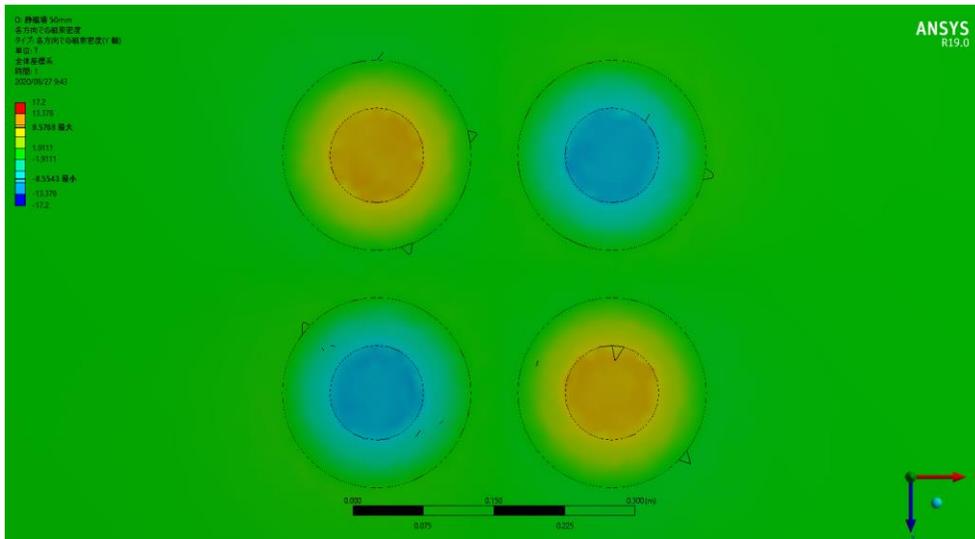
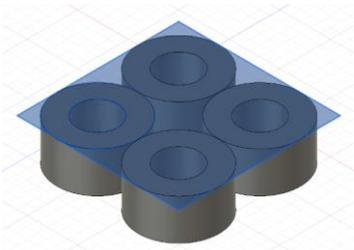
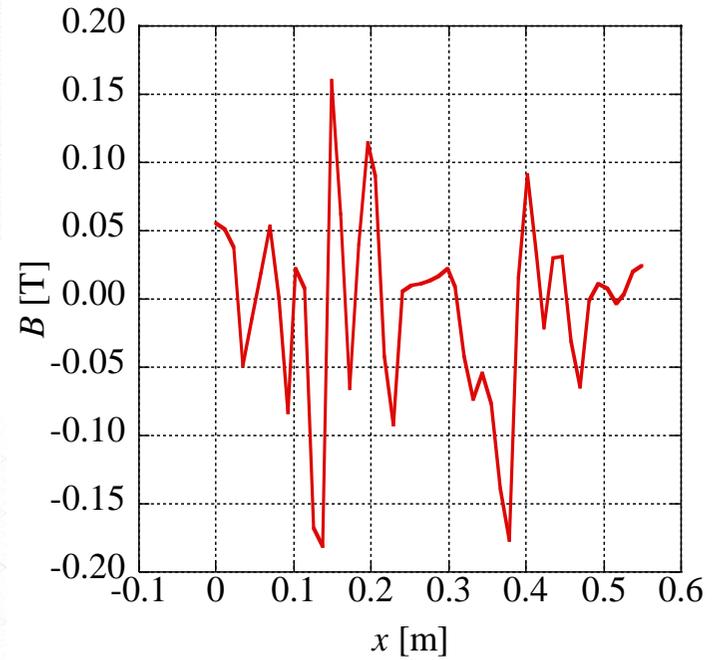
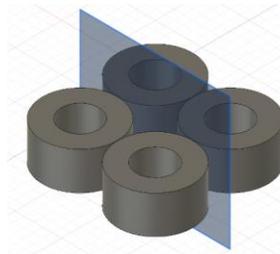
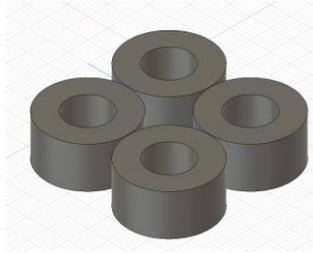
電流値
(各コイルに対して並列) エネルギー



$1/2I_0$, A+ B- C- D+ , $2I_0$, $1/2LI_0^2$

解析条件:

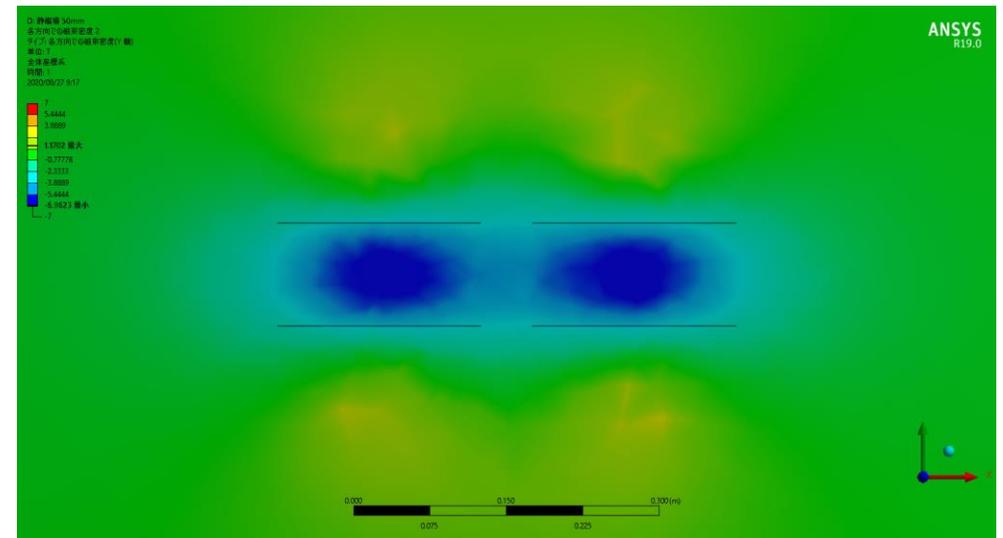
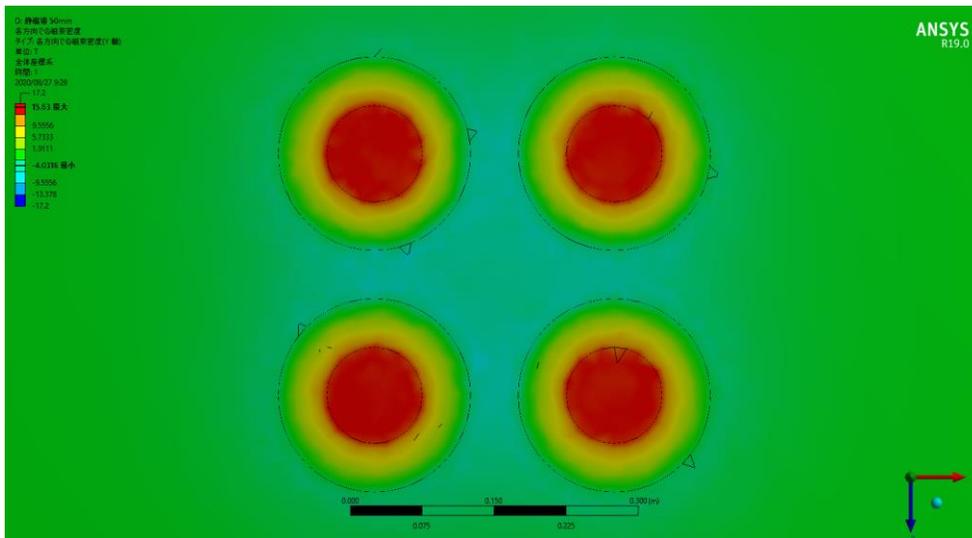
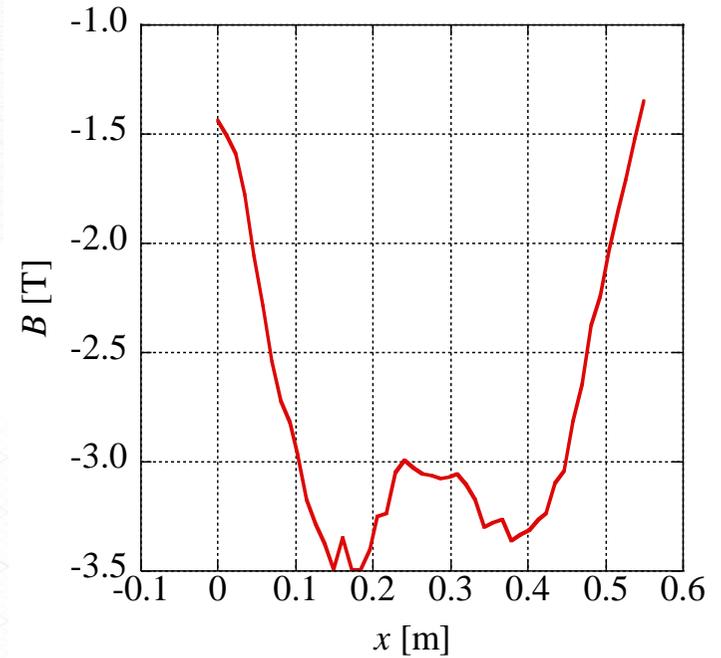
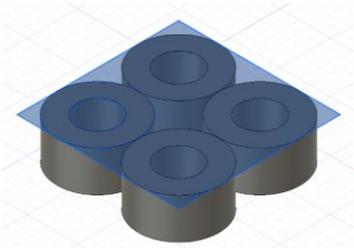
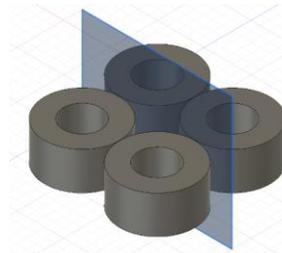
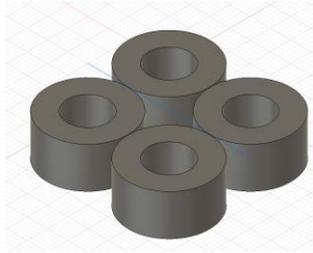
内径100mm, 外径200mm,
厚さ100mm, コイル間50mm
5000turn, 600A通電



$$I_0, A+B+C+D, 4I_0, 2LI_0^2$$

解析条件:

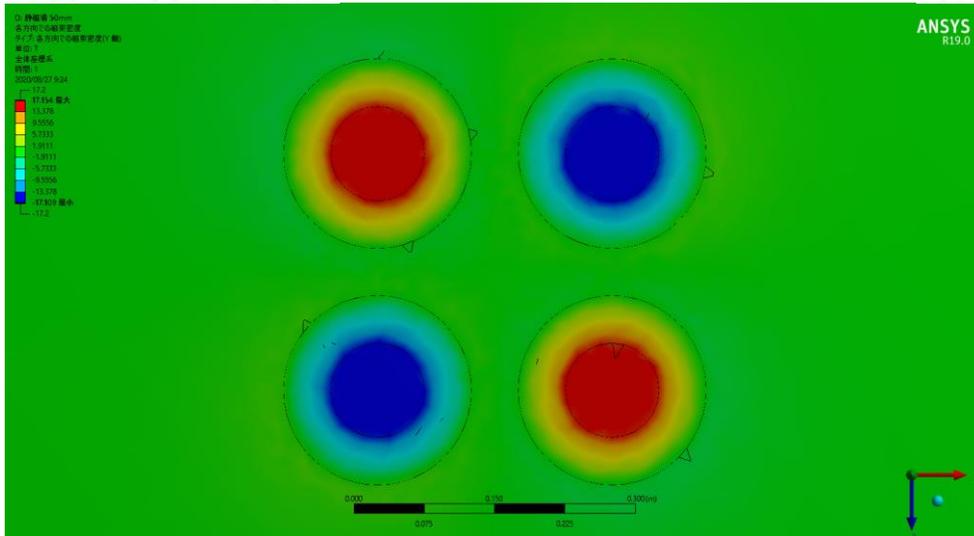
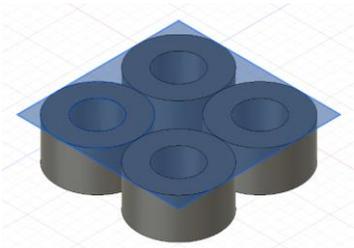
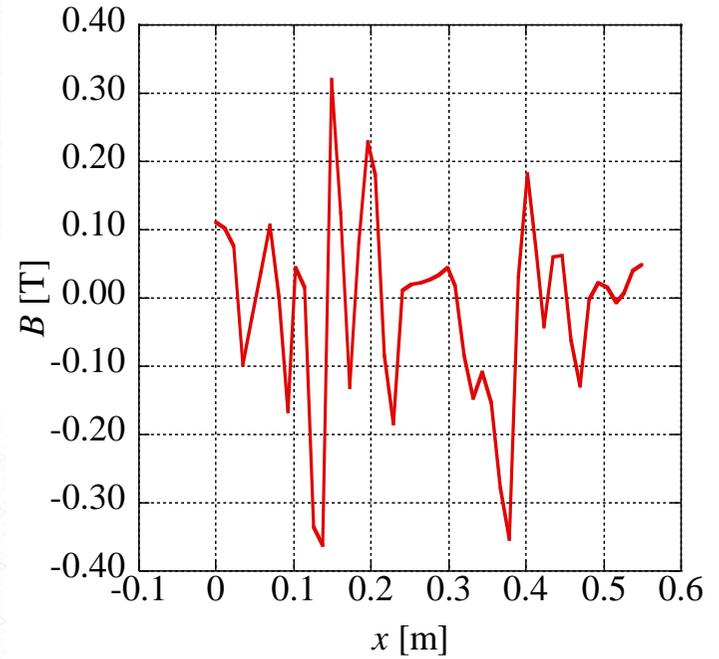
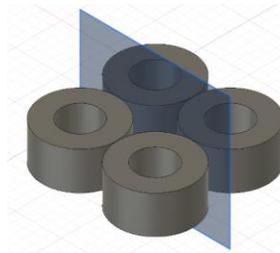
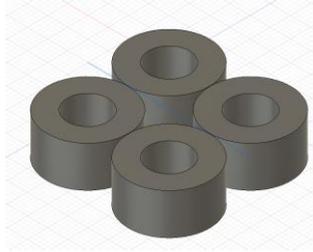
内径100mm, 外径200mm,
厚さ100mm, コイル間50mm
5000turn, 600A通電



$$I_0, A+ B- C- D+ , 4I_0 , 2LI_0^2$$

解析条件:

内径100mm, 外径200mm,
厚さ100mm, コイル間50mm
5000turn, 600A通電

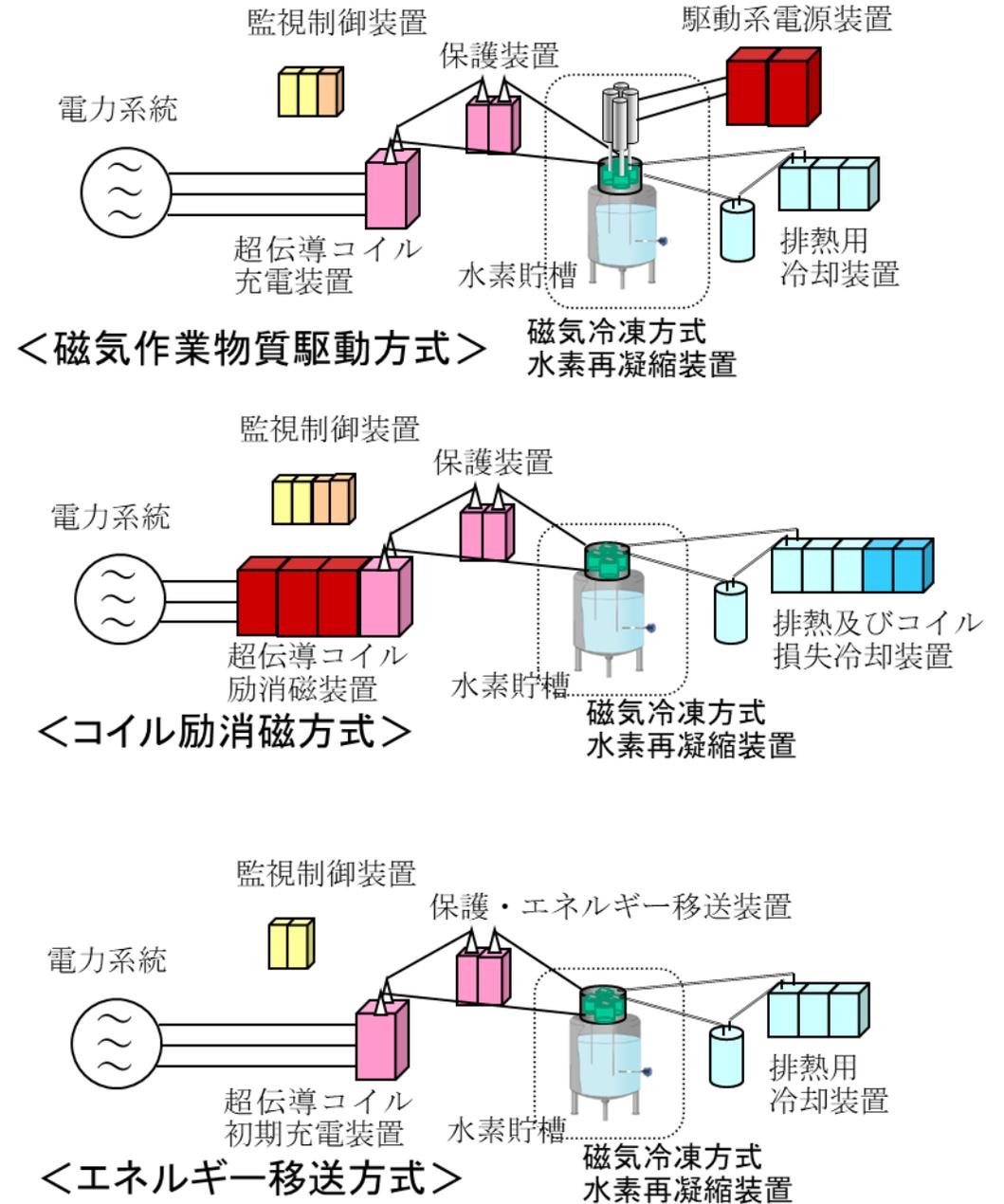


磁気冷凍による水素再凝縮システムの従来技術と本方式(エネルギー移送方式)によるシステム構成の比較

磁気作業物質を駆動する方式では、その出し入れに強力な駆動力が必要となり、駆動系が大型で、その電源も必要となる。

単純にコイルを励消磁する方式では、コイル用電源が大型になる。

本提案のエネルギー移送方式では、超伝導コイル間でのエネルギー輸送を利用するため、コイルの励消磁電源を大幅に簡略化でき、駆動系も不要なことからシステム全体がコンパクトとなる。



新技術のメリット・デメリット

- 完全静止型の磁気冷凍機
高耐久性、メンテナンスコスト削減
- 初期に充電が必要であるが、理想的にはその後の充電は不要
高効率な冷却システムの実現
- 磁場発生源である超伝導コイルは別途冷却が必要
水素再液化の場合は、液体水素の冷熱を利用
- エネルギー移送や極性反転にロスが発生する
超伝導コイル自体の交流損失は問題ない見通し

想定される用途

- 水素再液化向け磁気冷凍システム
- 電力安定化用エネルギー貯蔵システム冷却用
- 核融合用コイル冷却システム

など

また、磁場の繰り返し変化自体は、永久磁石の着磁技術への応用も考えられる。

実用化に向けた課題

- 現在、超伝導コイルの組合せによる磁場変動が可能なことを解析的に検証済み。しかし、電流転流に必要な制御機構の検証が未解決である。
- 今後、複数の超伝導コイルを組み合わせた磁場変化検証装置で実験データを取得し、水素液化に適用していく場合の条件検討を行っていく。
- 実用化に向けて、磁性材料の任意形状加工技術や量産技術を確立する必要もあり。

企業への期待

- コイル電源制御技術を持つ、企業との共同研究を希望。
- また、高効率水素液化システムを開発中の企業、液体水素利用分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 変動磁場生成システムおよびこれを用いた静止型磁気冷凍システム
- 出願番号 : 特願2020-177048
- 出願人 : 大学共同利用機関法人
自然科学研究機構
- 発明者 : 平野直樹、三戸利行、小野寺優太
- 登録番号 : 特許第7170337号

産学連携の経歴

民間会社の研究者としてNEDOやJSTプロジェクトに参画
2019年4月からは現組織にて産学連携共同研究等に従事

＜本提案に関連するプロジェクト参画実績＞

- 2011年度「戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発(ALCA)」プロジェクトの「高効率磁気ヒートポンプ材料の開発」参画
- 2014～2018年度(ALCA)プロジェクト「階層構造磁気蓄熱再生器を持つ磁気ヒートポンプの開発」参画
- 2014～2015年度(ALCA)プロジェクトの「新エネルギー構築のための液体水素冷却MgB₂超伝導線を用いた電力変換システム」参画
- 2016～2017年度(ALCA)プロジェクトの「液体水素冷却による超伝導電気機器の開発」参画

お問い合わせ先

自然科学研究機構事務局研究協力課

TEL 03-5425-1316

FAX 03-5425-2049

e-mail nins-sangaku@nins.jp