

炉心プラズマ磁場計測を目指した振幅変調型ヘリウム原子磁力計の開発に関する基礎研究

大阪大学大学院工学研究科
環境・エネルギー工学専攻 量子エネルギー基礎工学領域
福田研究室 博士前期課程二年生

清永 浩之

1. 研究背景

核融合発電はその過程で二酸化炭素を排出せず原子力発電のような使用済み核燃料の問題も生じない。更にもその燃料である水素同位体が半永久的に枯渇しないため、エネルギー課題を解決する決定打として期待されている。核融合発電は半世紀以上前から研究されており、なかでも「磁場閉じ込め方式核融合炉」(Fig.1)の開発が最も進んでいる。

この方式では、数億度まで加熱し電離した水素プラズマ（原子核と電子の混合気体）を磁力線の「カゴ」に閉じ込めることで得られる莫大な核融合エネルギーを利用する。しかし、商業用核融合炉の実現には未だ至っていない。この主要因の一つが閉じ込め磁場制御の困難性である。磁力線のカゴ（閉じ込め磁場）は、プラズマ周辺に配置されたコイルに流す電流とプラズマの運動（プラズマ電流）

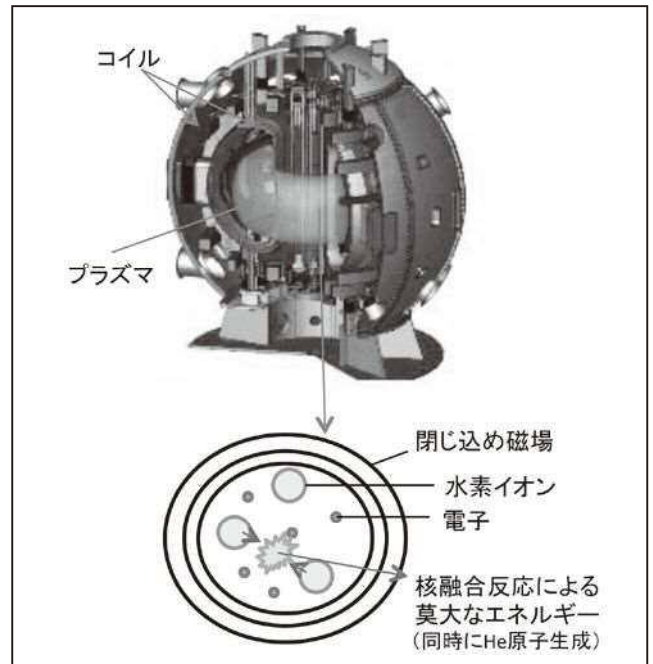


Fig.1 磁場閉じ込め核融合炉の原理 [1]

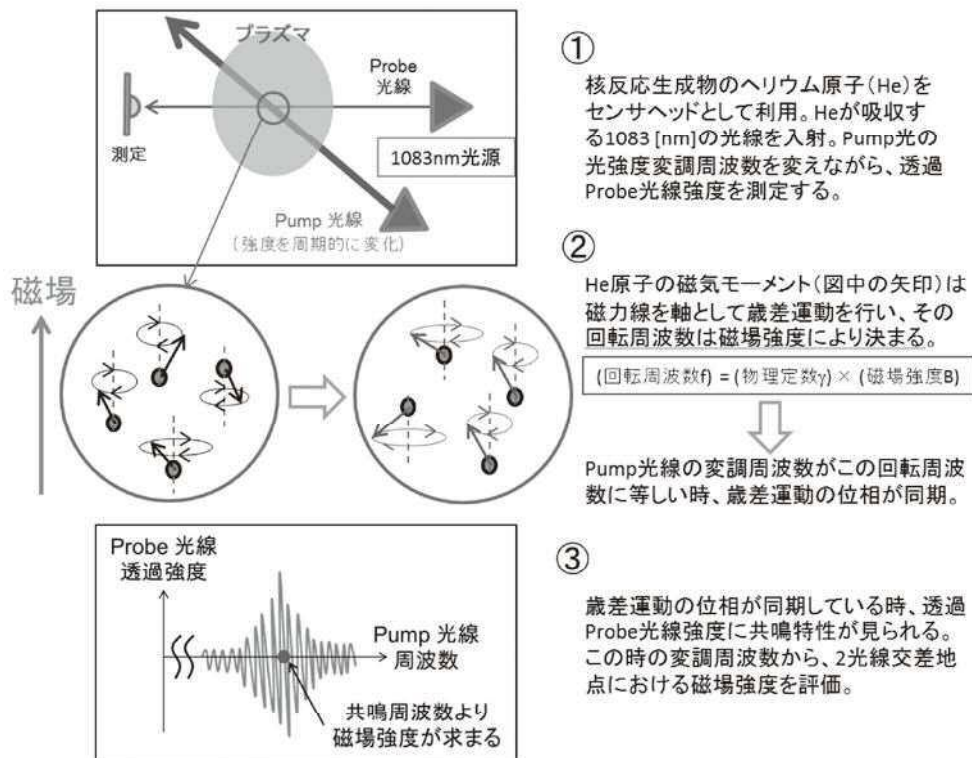


Fig.2 原子磁力計を用いたプラズマ内部の磁場配位測定の方法とイメージ

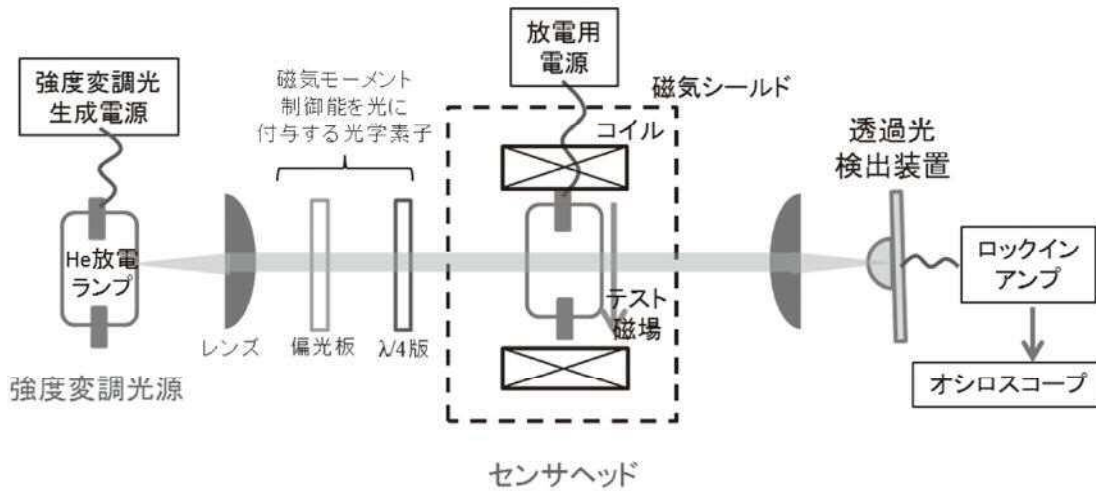


Fig.3 開発した原子磁力計試作機の構成

によって生じる磁場の重ね合わせとして形成される。プラズマ電流は直接制御できる物理量ではないため、閉じ込め性能の高い磁場配位を維持するためには恒常的な磁場の計測と制御が要求される。

しかし従来法ではプラズマ内部の磁場配位計測は困難であり、実際に形成される磁場配位に関する理解は十分でない。この課題を解決する核融合炉の新しい磁場計測手段として著者は原子磁力計に注目している。なかでも振幅変調型ヘリウム原子磁力計 (AM He AOM) [2] は、核反応生成物である He 原子をセンサヘッドとして利用することで、プラズマ中心領域の磁場分布計測を達成できる可能性がある。核融合炉への応用の可能性を検討するため本研究では AM He AOM の試作機を製作し、原理実証試験を行った。

2. 原子磁力計の原理

原子磁力計では、原子の磁気モーメント(スピン)が磁場印加時に行う歳差運動(ラーモア歳差運動)を制御/利用することで、印加された磁場強度を測定する。Fig.2 に磁場測定原理を核融合炉における計測イメージと共に図解する。

- ①プラズマ中のヘリウム原子に2本の光線(Pump 光線と Probe 光線)を照射する。その光強度を周期的に変調されている Pump 光は原子のスピン状態を制御する役割を持つ。また、透過 Probe 光強度からスピン状態を検出する。
- ②ヘリウム原子のスピンは磁力線の方向を軸として歳差運動を行っており、その周波数(ラーモア周波数)は印加磁場強度により決定される。Pump 光線の強度変調周波数がラーモア周波数に等しいとき、各スピンの歳差運動の位相は同期される。(図中の赤矢印の状態)
- ③歳差運動の位相が同期されている時、ヘリウム原子の

Probe 光線吸収量は大きく変調される(共鳴特性)。Pump 光線の強度変調周波数を掃引きすることで、透過 Probe 光に共鳴特性が現れる周波数を調べることができる。この共鳴周波数はラーモア周波数と一致しているため、この周波数から 2 光線の交差点における磁場強度が求まる。

3. 試作機の開発

Fig.3 に開発した試作機の構成を示す。今回は磁場計測実証が主目的のため構成の簡単な 1 ビーム系 [3] を採用した。試作機に組み込むセンサヘッド、光強度変調の可能な 1083 [nm] 光源の開発経緯は以下の通りである。

Fig.4 にセンサヘッド周辺の構成を示す。自作したヘリウム放電管をテスト磁場発生用コイルと共に磁気シールド内部に設置した。

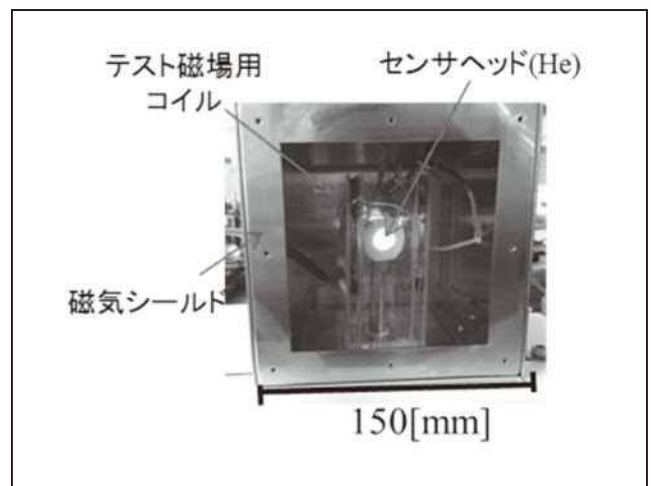


Fig.4 センサヘッド周辺の構成

放電により得られる励起ヘリウム原子がセンサヘッドとしての役割を果たす。周辺機器から生じる磁気ノイズの影響を除くため放電ランプは磁気シールド内に設置した。



Fig.5 高強度ホローカソード式ランプ

また 1083[nm] 光源として Fig.5 に示すような高強度ホローカソード式ヘリウム放電ランプを開発した。これは自作したガラス管内部に電極とヘリウムを封入したもので、予備実験で光強度が最大となった 12 [mm] 径陰極を採用した (Fig.6)。

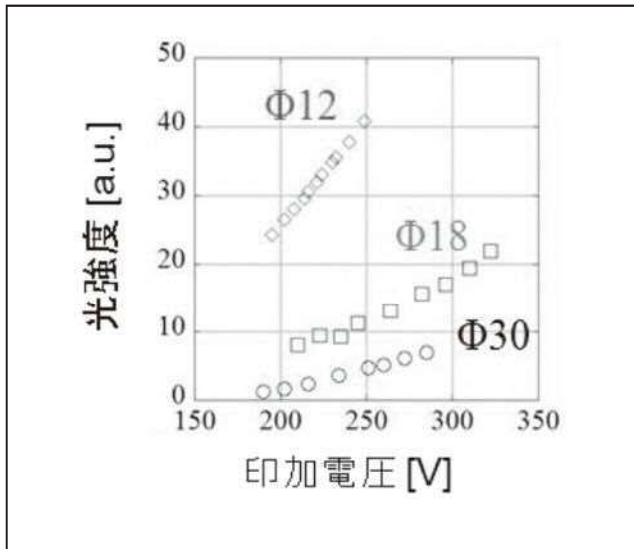
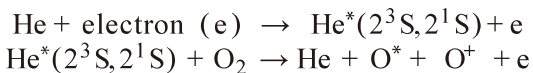


Fig.6 ランプ径による発光強度の比較

このように製作したランプで放電試験を行ったところ、放電に伴い 1083 [nm] の発光が急激に劣化していくことが分かった。1083[nm] の発光は準安定ヘリウム (He*) とその励起状態 (He (2p)) 間の遷移で得られる。放電中、スパッタリングにより電極表面から酸素が叩きだされ、以下の反応 (ペニング効果) を通じ He* が失われ放電が劣化したと考えられる。



極板から放出される酸素を放電領域から取り除くため、Fig.7 のようにランプ内に酸素吸収剤 (Fe) を配置した。また、吸収効率を上げるため、液体窒素冷却を併用した。こ

の手法により Fig.8 のようにランプ寿命を大幅に改善することに成功した。

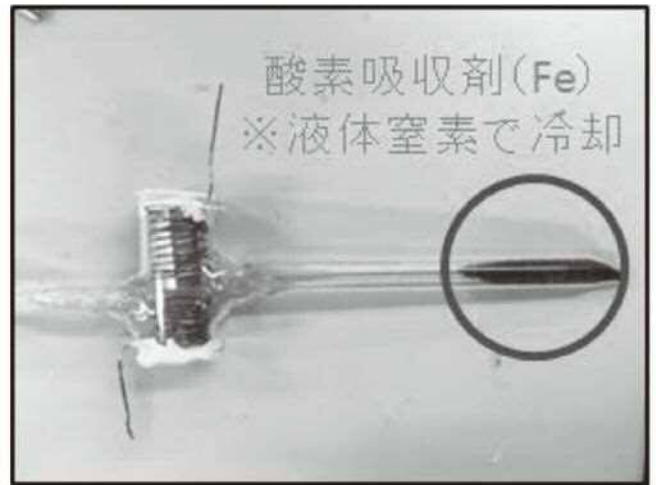


Fig.7 酸素吸収機構を備えた放電ランプ

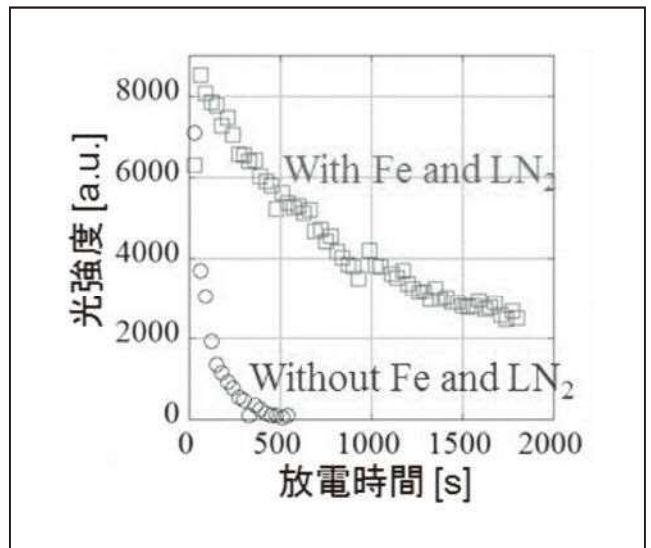


Fig.8 ランプ寿命の比較

強度変調光を得るため専用の電源を設計 / 製作した。Fig.9 にこの電源回路を用いて得られた出力電圧を示す。この時の矩形波周波数は 100[kHz] で、-600[V] の DC 出力電圧に振幅およそ 80[V] の矩形波をカップリングできていることが確認できた。Fig.9 に示した出力電圧の矩形波成分の周波数は可変である。この電源と製作した放電ランプを組み合わせることで、40-500 [kHz] の間で強度変調光を得ることができた。(Fig.10)

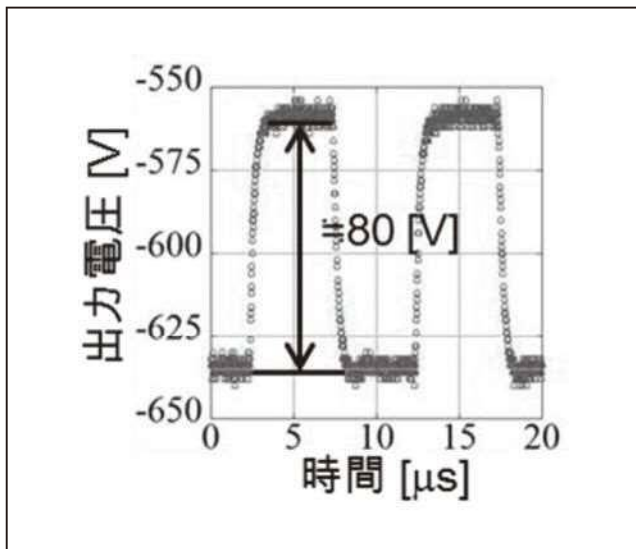


Fig.9 製作した電源の出力電圧

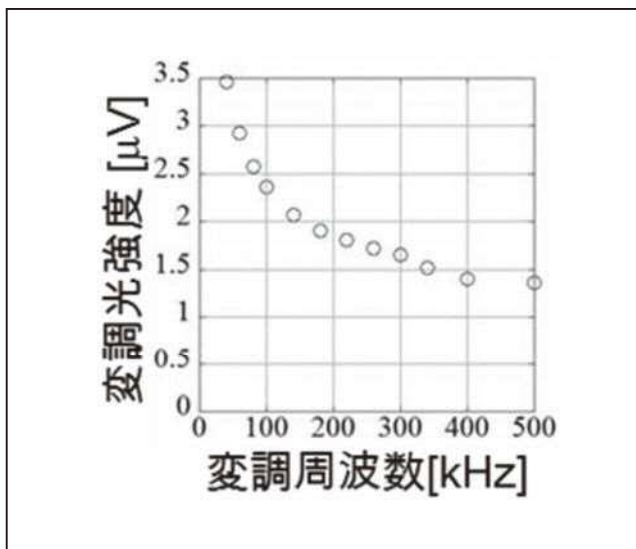


Fig.10 製作した光源の強度変調発光

4. 結果と考察

開発した試作機で行った磁場測定試験の結果を Fig.11 に示す。光源の強度変調周波数に対する透過率推移にはピークが見られた。ピーク周波数に対応する磁場強度はテスト磁場強度に近い値となり、磁場検出信号を得ることに成功した。また、吸収ランプ内で極板から生じる酸素はヘリウムのスピン状態を攪乱し共鳴信号を劣化させる。このため、無電極型の放電ランプを採用することで、信号を鮮明化できると考えられる。

本研究は従来困難とされていた核融合プラズマ内部の磁場空間分布計測の可能性を示し、第 32 回プラズマ・核融合学会年會において若手学会発表賞を受賞した。

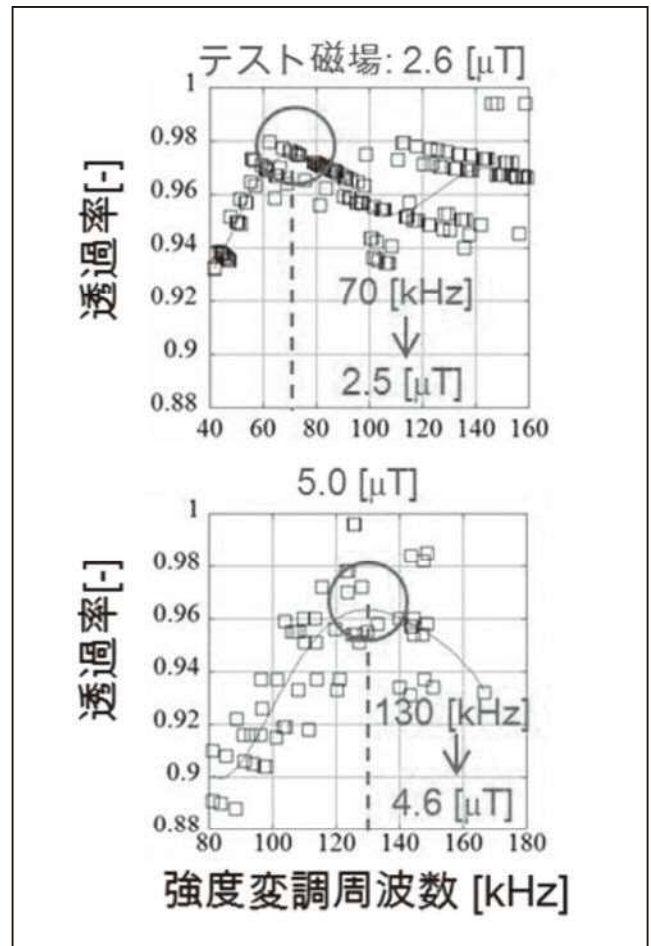


Fig.11 観測された磁場共鳴信号

・参考文献

- [1] ATOMICA の図を一部に使用
<http://www.rist.or.jp/atomica/data/pict/07/07050502/02.gif>
- [2] W.E.Bell and H.L.Bloom, *Phy.Rev.Lett.*6, pp.280, 1961
- [3] Volkmar Schultze et al., *Optics Express*, 20, 13, 2012



勤務先：三菱電機株式会社
生産技術センターにて電気回路の実装に関する技術開発に携わる。
趣味はランニングと読書。特に大阪大学OB、司馬遼太郎の作品がお気に入り。