

高出力レーザー圧縮による超高磁場発生の研究

電子工学専攻 米田研究室 有馬宏和

1. はじめに

数 1000T の超高磁場を物質に加えることが出来れば、サイクロトロンエネルギーが電子遷移のエネルギーと同程度になり新たな物性研究が期待できる。また、固体密度程度のプラズマでも熱エネルギー密度/磁場エネルギー密度比 β が 1 を下回る高密度磁化プラズマの生成が可能となり、リコネクションなどを通じた磁場エネルギーの急激な解放現象などの研究にも応用できる。従来、超高磁場発生では、種磁場を入れた円筒を電磁力で圧縮し、強磁場を得ている。この方法で 600T の磁場発生が報告されている [1]。これ以上に高磁場化するためには圧縮力を増強させなければならない。そこで本研究では、高出力レーザーを用いて数 10Mbar のアブレーション圧力を発生させ、その圧縮による超高磁場発生を提案している。図 1 のように、コイルに電流を流して、間にある 1mm ϕ 程度の円筒内に 20T 程度の種磁場を発生させ、1/10 の半径収縮率で 2000T の軸方向に観測領域が確保された磁場を用意することができる。

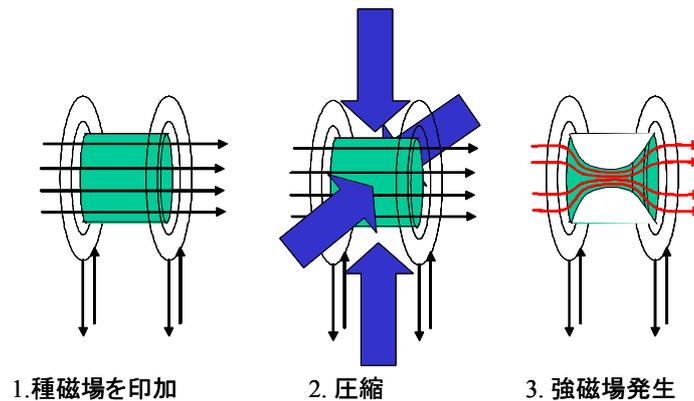


図 1 超高磁場発生の実験原理図

2. 円筒ターゲットの設計

圧縮される円筒ターゲットは、レーザーによるアブレーションを起こさせるためのアブレータ部、磁場を閉じ込める磁場遮蔽部、超高磁場を達成する中心の中空部からなる。ここで、圧縮時に十分に磁場を遮蔽可能な導電率を確保できるか、また、表皮効果厚以上の厚みを持つものを現有的高出力レーザーで押せるかが問題になる。同時に、圧縮前は種磁場がターゲットを透過する表皮効果厚以下の厚みでなければならない。円筒ターゲットの厚みは重要なパラメータであり、決める必要があるが、各パラメータは表 1 が示すように複雑に関係しており、詳細な設計を行わなければならない。そこで、照射する高出力レーザーは大阪大学のレーザーエネルギー学研究中心にある激光 XII

表1 本研究に関わるパラメータ

| | 初期パラメータ | プラズマパラメータ |
|-------|---|---|
| レーザー | 照射形状 光強度 I 波長 λ パルス幅 τ | アブレーション圧力 $p_a(t) = f(I(t), \lambda)$ Mass ablation rate $\dot{m} = f(I(t), \lambda, \rho)$ 圧縮までの時間 $t_f = f(r_0, \dot{m}, \rho_0, \tau)$ |
| ターゲット | 径 r 厚み d_0 物質 Z, A 密度 ρ_0 | skin depth $\delta = f(\rho(t), T(t), Z, A, t_f)$ $L_c = f(r_0)$ $T(t) = f(I, \lambda, \tau, r_0, d_0, Z, A)$ |
| 磁場 | 種磁場強度 B_0 | $B_{\text{final}} > 2000\text{T}$ |
| 電源 | インピーダンス Z_0 立ち上がり時間 t_r 電圧 V_c スイッチ素子 V_{sw} | $p_B = f(B_0^2/r^2(t)) = p_a(t)$ $Z_L(t) = f(t, L_c, Z_0)$ 電流 $I_c = f(Z_0, Z_{sw}, V_c, Z_L(t))$ transmission line $Z(E_{\text{in}}) < Z_0, Z_{sw}, Z_L(t)$ |

号を使うため、そのパラメータ ($I=10^{14} \text{ W/cm}^2$, $\lambda=1 \mu\text{ m}$, $\tau=2\text{ ns}$) を用い、初期半径 0.5 mm の円筒ターゲットにレーザー照射してアブレーション圧縮した時の半径と密度分布を、1次元の流体シミュレーションコードを利用して計算した結果を図2に示す。これは、圧縮開始から 3.8 ns 後の初期半径比 $1/5$ になった時の密度分布を示している。この領域での導電率モデル (Lee-More model) から各点での導電率を求め [2], 圧縮時間の逆数で決まる有効周波数 (この場合 100 MHz) から、圧縮時に磁場を遮蔽する表皮効果厚を中心から積分して計算した。円筒ターゲット中心からの距離と skin depth との比の関係を図3に示す。すると、遮蔽材料に銅を使えばコイルの中心から $130\mu\text{ m}$ で磁場が $1/e$ になることがわかった。そのために必要な質量から圧縮前のターゲットの厚みは最低 $4.18 \mu\text{ m}$ 以上必要とわかり、質量から圧縮前の磁場遮蔽部に銅 $15 \mu\text{ m}$, アブレータ部に $\text{CH}35 \mu\text{ m}$ の図4のような円筒ターゲットを作ればよいことがわかった。

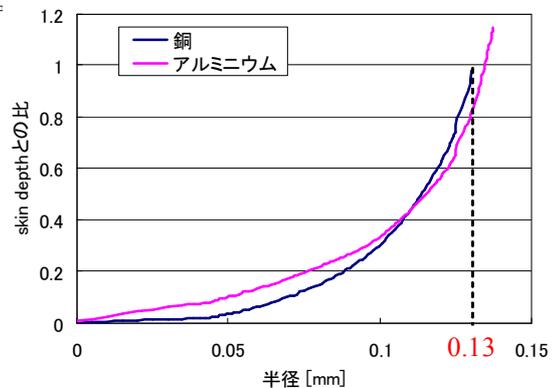
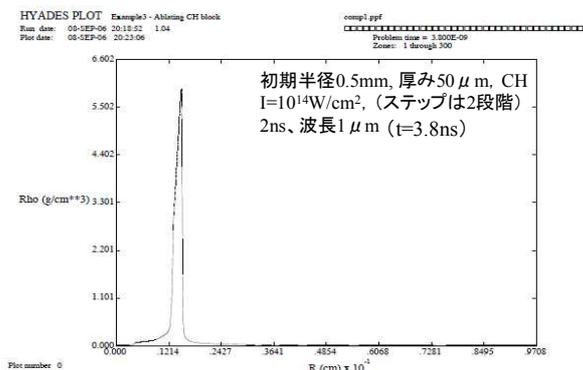


図2 アブレーション圧縮のシミュレーション

図3 半径と skin depth との比の関係 ($t=3.8\text{ ns}$)

3. 電源スイッチ，種磁場コイル及び導波路

3.1 電源スイッチ

圧縮前は円筒ターゲットを透過する skin depth を持つ 20T 以上のパルス磁場が必要である。前節から円筒ターゲットの大きさは決まっており，その厚みを透過するには立ち上がり時間 $t_r > 8.13\text{ns}$ の条件が発生する。同時に，1mm ϕ の領域に磁場を発生させるためのコイルは数 nH のインダクタンスしか持たないため，効率のよい磁場発生を行なうには立ち上がり時間が早くなければならない。例として，図 5 のような直径 1mm，長さ 3mm，巻数 3 回の 2 つのコイルに 32.5kA の電流を流すことが出来れば達成出来るが，

コイルのインダクタンスは 4.4nH である。装置のインピーダンスはその形状から最低でも 1Ω なので， t_r は数 10ns 程度が望ましい。このような低インダクタンスで数 10ns の立ち上がり時間を実現するために，スイッチング素子を多点で構成したレーザートリガー型スパークギャップ (LTSG) を使った。図 6 はその写真である。LTSG はジッターが短いため数 cm の間隔で平行に駆動可能で，装置を小型で構成できる。また，各スイッチの電源部分にインダクタンスの大きなコイルを挿入し，コイルに接続する導波路をコイル直前まで分別することでパルスのスイッチを個別化した。これによって他のスイッチの電位変化の影響を受けることなく，スイッチングが平行に動作させることが出来た。

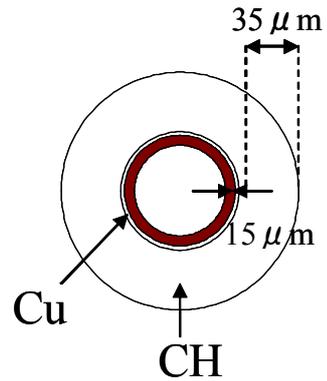


図 4 円筒ターゲット

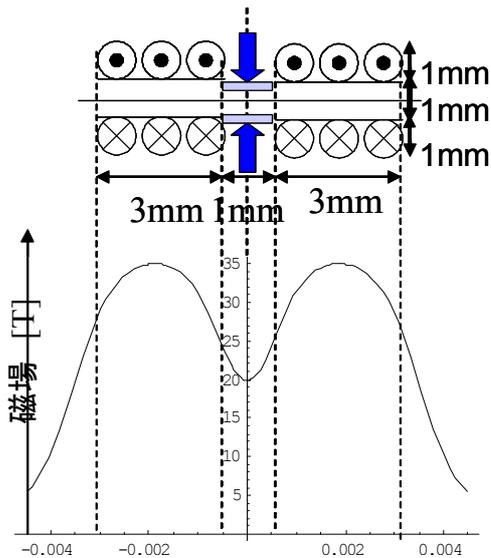


図 5 2 つのコイルの作る磁場強度分布 (コイルに 32.5kA を流した時)



図 6 LTSG の外観 (上部の窓からレーザーを照射してスイッチングする)

3.2 種磁場コイル

種磁場発生のコイルは密度による磁場発生の効率だけでなく、線間にかかる電圧の絶縁の問題がある。線間電圧は巻数に反比例するが、数 kV になる。これらの問題を解決するために、図 7(a) のように銅のシートの上にカプトンを挟んで多層で巻いた。線間が $25\mu\text{m}$ のカプトンの場合、絶縁破壊してしまったため (図 7(b))、線間はそれ以上の厚みを持たせる必要がある。この場合、厚みのあるカプトンを使うか、 $25\mu\text{m}$ のカプトンで複数回巻くかが考えられるが、巻きやすさを考えた場合、後者の方が有効である。しかし、コイル内部から出たリード線と巻いたコイルの横部分はカプトンが薄くなり絶縁しにくいいため、導波路と接続する際リード線はなるべくコイル本体と離さなければならない。

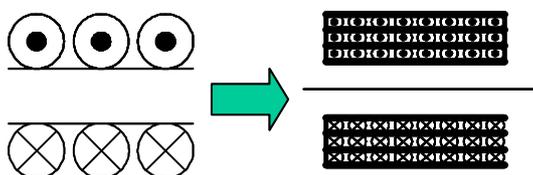


図 7(a) コイルの巻き方



(b) コイルの線間で絶縁破壊

3.3 導波路

実際に高出力レーザーを照射する実験を行なうには装置の全てをチェンバー内に入れられないため、電源部分とコイルを接続する導波路が必要になる。長さは 3m 以上で、電源とコイルのインピーダンス整合と電極間の絶縁の問題がある。導波路のインピーダンスは以下の式で計算できる。

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \left[\frac{W}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{d} + 1.444 \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

ここで、 ϵ_r は比誘電率でカプトンの場合 3.4、 W は幅で d は極板間距離である。極板間は絶縁破壊電圧の制約があるため、短くするには限度がある。これらを考慮して図 8 のような導波路を製作した。

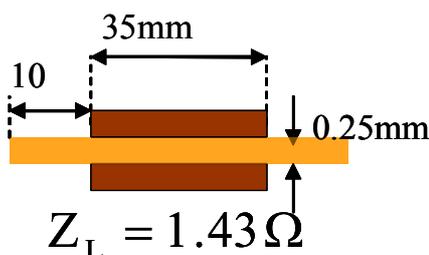


図 8 導波路

4. 実験

4.1 実験装置の構成

実験装置の概略を図 9 に示す。高圧電源でコンデンサーバンクに充電し、KrF レーザーを LTSG に照射してスイッチングを行い、 1Ω のストリップ線路でチャンバー内のコイルに電流を流した。磁場強度はコイル内にピックアップコイルを入れ、電磁誘導からその電圧を測定した。

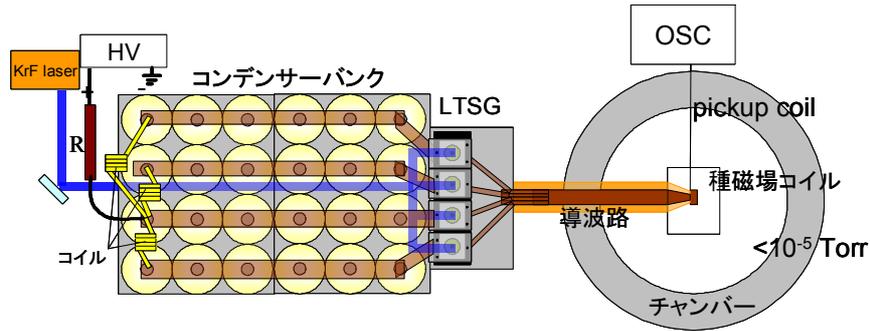


図 9 実験概略図

4.2 スイッチ数を変化した時の実験結果

装置のインピーダンスは装置の大きさとスイッチが持つインダクタンスが決める。大きさは素子が持つサイズと、高電圧の絶縁問題があるために改良の限度があり、スイッチ部分が重要になる。図 10 はピックアップコイルで観測した、同一電源条件でレーザートリガースパークギャップスイッチ数を変えた時の磁場波形 (dB/dt) の変化、表 2 はそのパラメータの変化をまとめたものである。コイルのパラメータは 1.6mm ϕ 、長さ 6mm 、巻数 4 回で、コンデンサ容量は 32.4nF 、印加電圧は 20kV である。1 スイッチではスイッチ部分に大きなインダクタンスが生じるため、4 つのスイッチを平行に動作させてインダクタンスを小さくした。結果、スイッチの持つインダクタンスは $1/4$ の 35nH になった。磁場強度もインダクタンスの減少による大電流化により 1 つのスイッチでは 5.5T だが、4 つの平行スイッチでは 7.6T に増加した。

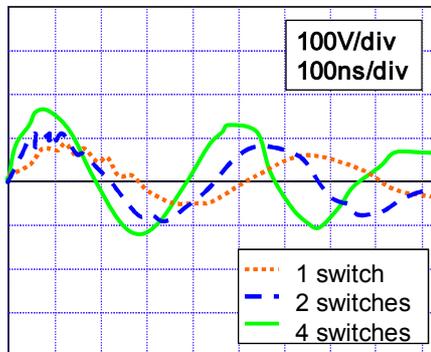


図 10 スイッチ数を変えた時の磁場波形 (dB/dt) の変化

表 2. スイッチ数を変化した時のパラメータ

| | 1 switch | 2 switches | 4 switches |
|---------------------|----------|------------|------------|
| 周期 T | 520 ns | 450 ns | 390 ns |
| L_{result} | 220 nH | 160 nH | 120 nH |
| B_{result} | 5.5 T | 6.9 T | 7.6 T |
| スイッチの L | 135 nH | 75 nH | 35nH |

4.3 種磁場発生実験

装置全体の持つインダクタンスを小さくすることで1つのコイルでも円筒ターゲット内に 20T を発生することが出来る. 図 11 は 1mm φ, 長さ 2.5mm, 巻数 10 回のコイル内に設置したピックアップコイルの磁場波形 (dB/dt) の変化, 表 3 はその結果をまとめたものである. コンデンサ容量は 64.8nF, 破線はチャンバー内が空气中で印加電圧は 18kV, 実線はチャンバー内が真空中 ($<10^{-5}$ Torr) で印加電圧が 20kV である. その結果, コイルの中心で 18kV なら 31T, 20kV で 36T の磁場強度を観測した. これらの結果は理論値とほとんど変わらず, コンデンサーバンクの印加電圧を上げることで磁場を増加できる.

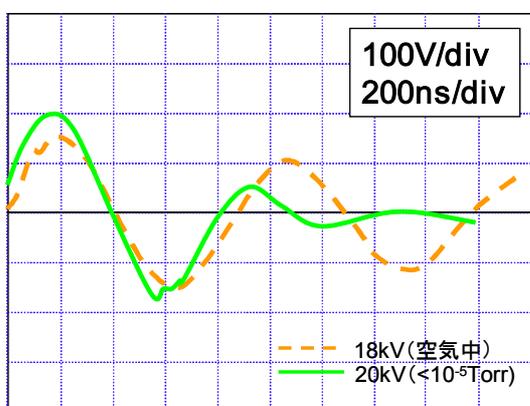


図 11 印加電圧を変えた時の磁場波形 (dB/dt) の変化

表 3 種磁場発生実験結果

| | | |
|---------------|--------|-----------------|
| 波形の色 | 黄色 | 緑 |
| 環境 | 空气中 | $<10^{-5}$ Torr |
| 印加電圧 | 18 kV | 20 kV |
| $L_{circuit}$ | 320 nH | 260 nH |
| B_{scale} | 32.5 T | 36.0 T |
| B_{result} | 31 T | 36 T |

5. 結論

4 つ平行に動作するレーザートリガー型スパークギャップを有するラインの同時駆動によってインダクタンスを小さくし, 立ち上がり時間を早くすることが出来た. 1つの種磁場発生コイルで横に設置した円筒ターゲットに 20T を発生可能であることがわかった. また, コイル中心で発生する磁場強度は 30T 以上を超え, 単体でも磁場を印加した物性研究が可能になった.

圧縮実験は 2 月 26 日~3 月 2 日に大阪大学で激光 XII 号を使って行なう.

参考文献

- [1] Y. H. Matsuda, F. Herlach, S. Ikeda, and N. Miura: REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS VOLUME 73, NUMBER 12 (2002)
- [2] M.P. Desjarlais, Volume 41, Issue 2-3, Pages 267 - 270 (2001)