

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 15 日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656184

研究課題名(和文)液体金属を利用した卓上型で高輝度・高繰り返し可能な短波長光源への挑戦

研究課題名(英文)Challenge to compact, intense, and repetitive light source by using liquid metal

研究代表者

原田 信弘 (Harada, Nobuhiro)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：80134849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：X-Pinch型光源の課題である各ショットに応じて細線の張り直しの簡略化とX-Pinchを実現するために必要なエネルギー量が増大する点を解決するため、テーパコーン電極と液体金属流を用いた新奇のX-pinch放電を検討することである。そのために、(1) 高電流立ち上がり率を有するパルス電源の構築と(2) 液体金属流を用いたX-pinch用負荷制御の検討を行った。その結果、所望の電流立ち上がり率は得られたが、インダクタンスの低減が課題となることが明らかとなった。また、液体金属流を用いたX-pinch用負荷制御にスパイクノズルを用いることで、液体金属表面の圧力を制御できることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：To improve reduction of required energy and repetitive X-Pinch plasma, we consider a new type X-pinch load and relative equipment. The load control using liquid-metal flow and the pulsed-power system with a high rate of current rise toward advanced X-pinch is demonstrated. The rate of current rise with the pulse-forming-network modules is improved the reduction of the circuit inductance. The spike nozzle for load control using liquid-metal flow improves the pressure at the liquid metal surface.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：X-pinch 短波長光源 液体金属流 パルスパワー放電 超音速フリージェット

1. 研究開始当初の背景

高輝度 X 線点光源を実現するために、レーザー生成型、パルスパワー放電型など数多くの高輝度 X 線発生方式が検討されてきた。特に、パルスパワー放電を用いた X-Pinch 型の光源は、細線に流れる電流と流れた電流によって生じる自己磁場によってピンチ効果が発生し、細線が交わる部分が光源となる事から微細な点光源として有望である事が明らかとなっている。しかしながら、X-Pinch 型光源の大きなデメリットは、各ショットに応じて細線の張り直しが必要であることや、細線の張り直しの簡便さを補うため、ある程度の細線サイズを持っているため、X-Pinch を実現するために必要なエネルギー量が増大する点が挙げられる。そのため、これらの課題を解決するために、液体金属流とパルスパワー放電を用いた新規の X-pinch 放電を提案し、検討を行った。

本装置が実現すれば、X-Pinch の特色を有しながら、高繰り返し性を実現できる点が大きな学術的特色である。これによって、繰り返し性によって応用が制限されていた X-Pinch を利用したリソグラフィ光源、短時間照射による分析の高効率化など、学際的に本装置を用いた光源の応用分野を広げる事が期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、X-Pinch 型光源の課題である各ショットに応じて細線の張り直しの簡略化と X-Pinch を実現するために必要なエネルギー量が増大する点を解決するため、テーパコーン電極と液体金属流を用いた新奇の X-pinch 放電を検討することである。そのために、(1) 高電流立ち上がり率を有するパルス電源の構築と(2) 液体金属流を用いた X-pinch 用負荷制御の検討を行った。

3. 研究の方法

<3.1>高電流立ち上がり率を有するパルス電源の構築

液体金属流とパルスパワー放電を用いた新奇の X-pinch 放電を実現するためにコンパクトなパルスパワー電源の開発を行なった。通常、X-pinch に要求される電流パルスの電流立ち上がり率は 0.10 ~ 10 kA/ns であり、非常に高い電流立ち上がり率が必要である。そのため、従来の X-pinch 装置はマルクス発生器と Pulse forming line を用いた大規模な電源装置が用いられており、電源装置の小型化は必須であった。そのため、本研究では、負荷とのインピーダンスを低減でき、ピーク電流が保持できること、製作が容易であるという利点を持つ Pulse Forming Network(PFN) を用いた電源装置を検討した。

図 1 は、本研究で用いたパルス電源と X-pinch 負荷部の概念図を示している。本研究では X-pinch 用パルス電源の指針を得ることを目的として3段の PFN をモジュール化し

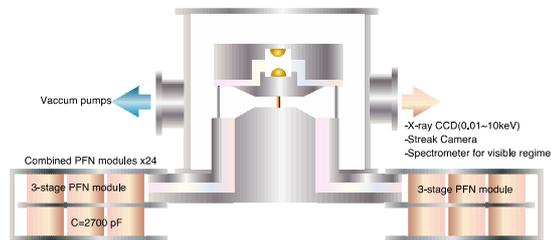


図 1 本研究で用いたパルス電源と X-pinch 負荷部の概念図

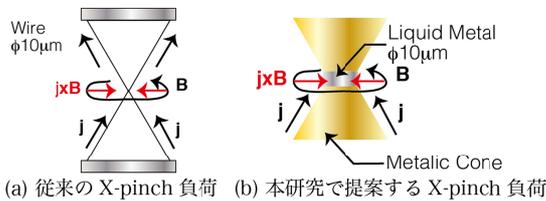
たパルスパワー装置の検討を行った。PFN モジュールは、1 段当たりの静電容量 2700pF、1 段あたりの線路インダクタンス 73nH となっている。2 対の PFN モジュールを 1 組とし、48 個の PFN モジュールが同軸円筒形状の X-pinch 発生装置に接続される。X-pinch 発生装置内には X-pinch 様電極と高電圧ギャップスイッチが包含され、ターボ分子ポンプにより高真空にすることができる。X-pinch 負荷に流れる電流をログスキーコイルによって計測し、ピーク電流値及び電流立ち上がり率を評価する。また、外部から X 線 CCD カメラやストリークカメラ、分光器等により観測可能となっている。

パルスパワー電源の小型化のためには、装置インピーダンスの低インダクタンス化が必要である。低インダクタンスな装置となっていることを確認するため、装置インダクタンス及びギャップスイッチのインダクタンスを実験により評価した。また、必要なモジュール数についても数値解析により評価を行った。

<3.2>液体金属流を用いた X-pinch 用負荷制御の検討

図 2 に従来型の X-pinch 装置の負荷と本研究で提案する液体金属流を用いた X-pinch 用の負荷の概念図を示す。従来の X-pinch 装置の負荷は、直径 10 μ m 程度の金属細線を複数本設置し、電流を細線が重なり合うところに集中させる。これにより、細線に流れる電流と、電流を供給することで発生した自己磁場によりローレンツ力が発生し、細線が重なり合った部分がピンチされる。この際に高温・高密度プラズマが発生し、短波長光が得られることが報告されている。さらにこの概念を拡張し、電極形状に工夫を施し、細線の設置本数を減らした Hybrid X-pinch と呼ばれる負荷も存在する。従来法では、細線にパルス大電流を印加するため、X-pinch 負荷はアブレーションしてしまい、連続運転を実現するためには X-pinch 負荷の改良が必要不可欠であった。

本研究では、Hybrid X-pinch の概念を応用し、液体金属流を用いた X-pinch 用の負荷について検討した。液体金属流を流すことで課題となるのは、(1)液体金属流の膨張の抑制、(2)液体金属流の制御方法の確立、である。本研究では、それに適用可能なノズル形状を設計し、検討を行った。



(a) 従来の X-pinch 負荷 (b) 本研究で提案する X-pinch 負荷
 図 2 従来型の X-pinch 装置の負荷と
 本研究で提案する液体金属流を
 用いた X-pinch 用の負荷の概念図

4. 研究成果

<4.1>高電流立ち上がり率を有するパルス電 源の構築

図 3 にコンデンサ数を固定した場合の PFN モジュールの段数に対する電流立ち上がり率のシミュレーション結果を示す。この結果より、PFN モジュールの段数が電流立ち上がり率および最大電流値に影響することがわかる。ピンチプラズマを保持するためには、高い電流立ち上がり率とともに電流パルス幅も重要となることから、3 段の PFN モジュールとした。

図 4 に 3 段の PFN モジュールを用いた場合の電流立ち上がり率の依存性を示す。この結果、電流立ち上がり率が 1kA/ns を実現するためには、非常に低い装置インダクタンスが要求されることがわかる。一方、印加電圧を増加させることで装置インダクタンスに関しての条件が緩和できることが分かる。

図 5 は、3 段の PFN モジュールを 48 個接続した場合の典型的な電流波形である。このときの電圧は 10kV とした。負荷には直径 1mm の銅線を用いることで短絡負荷としている。放電波形にフィッティングした結果、装置のインダクタンスは 60nH と見積もられた。また、電流立ち上がり率は 0.15 kA/ns であることがわかった。本研究で用いた X-pinch 装置のインダクタンスの設計値と実験で得られたインダクタンスを比較した結果、実験で得られたインダクタンスの方が高くなっていることが明らかとなった。この原因については、ギャップスイッチのインダクタンス及び X-pinch 負荷部から発光を取り出せる様

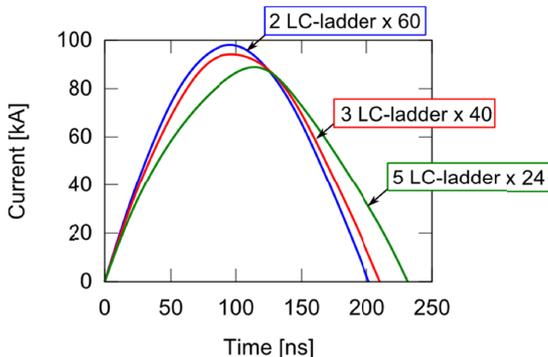


図 3 コンデンサ数を固定した場合の
 PFN モジュールの段数に対する電流
 立ち上がり率のシミュレーション結果
 にスペーサを用いて擬似同軸円筒としてい
 るためである。そのため、ギャップスイッチ

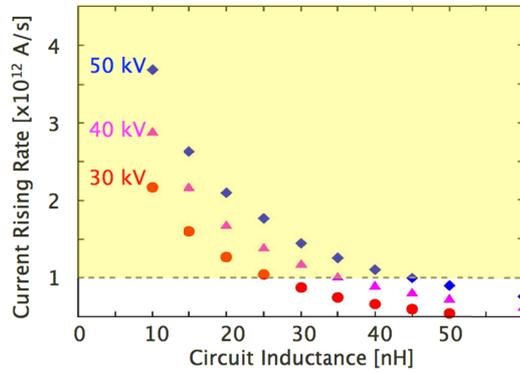


図 4 3 段の PFN モジュールを用いた場合の
 電流立ち上がり率の依存性

のインダクタンスを低減するためにマルチギャップスイッチにすることやパッシェン則に基づいて真空度を制御することでギャップスイッチ間隔を縮めることが必要であることが明らかとなった。

また、電流立ち上がり率を上昇させるために PFN の並列数を変化させ、放電試験を行った。この結果、PFN の並列数を増やすことで電流立ち上がり率が上昇することを実験的及び数値解析により明らかにし、理論的に一致していることが明らかとなった。これにより、要求される電流立ち上がり率を実現するための充電電圧が明らかとなった。

<4.2>液体金属流を用いた X-pinch 用負荷制御 の検討

X-pinch 放電を発生させるために真空中で液体金属を利用すると、液体金属が膨張・蒸発するため、液体金属のサイズが大きくなってしまふ。そのため、X-pinch を実現するために必要な電流量が増加し、装置及び短波長光源を得ることが困難となる。

そこで、本研究では、ジェットエンジンで用いられるスパイク型ノズルを用いて超音速ヘリウムを供給し、液体金属表面に流すことで、液体金属の膨張・蒸発を低減させることを検討した。ヘリウムは短波長光に対して吸収領域を持たないため、ガス流の挙動を評

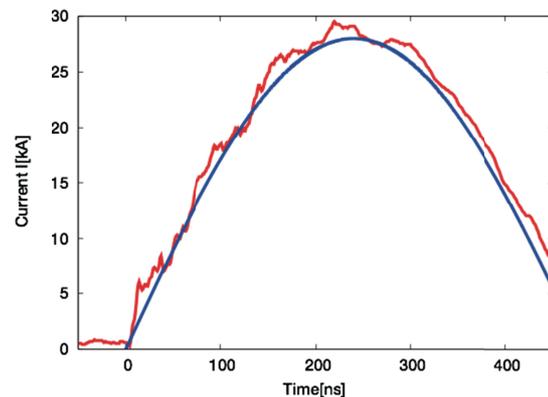


図 5 3 段の PFN モジュールを 48 個接続
 した場合の典型的な電流波形
 価することが重要である。

図 6 に液体金属流を用いた X-pinch 用負荷

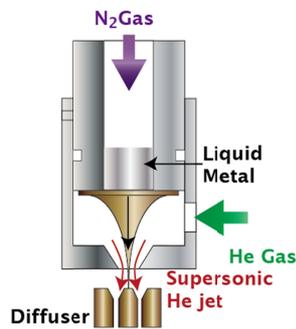


図6 液体金属流を用いた X-pinch 用
負荷制御実験装置の概念図

制御実験装置の概念図を示す。高圧窒素ガスにより液体金属を押し出し、先端に直径100 μ mの穴があいており、液体金属が供給される。供給された液体金属流は、下部に設置された液体金属受けに流れ出る。液体金属流の膨張を抑えるために、ヘリウムガスを供給する。ヘリウムガスは液体金属流供給部の外側に設置された貯気槽に一旦蓄えられ、超音速ノズルを介して、真空中を伝搬する。真空中を伝搬した超音速ヘリウムガス流は、ディフューザーで回収し、圧力回復を図る。

この際のガス流の挙動を解析するために2次元定常流の解析を行った結果、液体金属表面では大気圧に近い圧力を有することが明らかとなった。現在、実機による実験をすすめており、大電流パルス放電を実施すると先端電極が損耗することや、液体金属流を押し出すために加圧していることから、ノズル先端の強度が重要なパラメータとなることが明らかとなった。

今後、これらを統合して実験できる実験系を構築し、テーパコーン電極と液体金属流を用いた新規の X-pinch 放電の検討を進める。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Toru Sasaki, Yasutoshi Miki, Fumitaka Tachinami, Hiroataka Saito, Takuya Takahashi, Nobuyuki Anzai, Takashi Kikuchi, Tsukasa Aso, Nob. Harada, "Warm dense matter study and pulsed-power developments for X-pinch equipment in Nagaoka University of Technology", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, **733**, pp. 28-31 (2014) 査読有り
Fumitaka Tachinami, Nobuyuki Anzai, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Nob. Harada, "Study on pulsed-discharge devices with high current rising rate for point spot short-wavelength source in dense plasma observations", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A,

733, pp. 25-27 (2014) 査読有り

Takuya Miyamoto, Fumitaka Tachinami, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi and Nob. Harada, "Developments of compact pulsed-power system toward X-ray sources", EPJ Web of Conferences, **59**, 10002 (2013) 査読有り

〔学会発表〕(計 9 件)

佐々木徹, 安西信幸, 武脇大樹, 高橋一匡, 菊池崇志, 阿蘇司, 原田信弘, 「高繰り返し X-pinch 光源のための液体金属流制御法の検討」, 第30回プラズマ・核融合学会年会, 03aE04P, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2013年12月3日

Nobuyuki Anzai, Daiki Takewaki, Fumitaka Tachinami, Kazumasa Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Tsukasa Aso, Nob. Harada, "Study on Pulsed-discharge Devices by using Pulse Forming Network Modules Toward Intense X-ray Source", The Eighth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA 2013), P.Tu_39, p.182, 奈良県立新公会堂, 2013年9月9日

武脇大樹, 安西信幸, 高橋一匡, 佐々木徹, 菊池崇志, 阿蘇司, 原田信弘, 「高輝度 X 線点光源用電源のためのパルスフォーミングネットワーク・モジュール接続方法の検討」, 電気学会新エネルギー・環境研究会, FTE-13-027, まちなかキャンパス長岡, 2013年9月26日

N. Anzai, F. Tachinami, D. Takewaki, T. Sasaki, T. Kikuchi, T. Aso, N. Harada, "Study on Pulse Power Supply by Using Pulse Forming Network Modules Toward Intense X-Ray Source", IEEE Pulsed Power & Plasma Science Conference (IEEE PPS 2013), P5-42, Hyatt Regency, San Francisco, 2013年6月16日

安西信幸, 武脇大樹, 立浪史貴, 佐々木徹, 菊池崇志, 阿蘇司, 原田信弘, 「高輝度短波長光源のためのパルスフォーミングネットワークモジュールによる高立ち上がりパルス電源の構築」, 電気学会プラズマ・放電・パルスパワー研究会, PST-13-050, PPT-13-035, ED-13-040, まちなかキャンパス長岡, 2013年5月16日

立浪史貴, 佐々木徹, 安西信幸, 菊池崇志, 阿蘇司, 原田信弘, 「高輝度短波長光源のための小型パルス電源回路の構築」, プラズマ・核融合学会第29回年会, 28E41P, クローバープラザ(福岡県春日市), 2012年11月28日

安西信幸, 立浪史貴, 佐々木徹, 菊池崇志, 阿蘇司, 原田信弘, 「Pulse Forming Network を用いた高輝度短波長光源の検討」, 電気学会東京支部新潟支所研究

発表会 ,P-15 ,長岡技術科学大学 ,2012
年 11 月 10 日

Fumitaka Tachinami, Nobuyuki Anzai,
Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Nob. Harada,
"Study on pulsed-discharge devices with
high current rising rate for point spot
short-wavelength source in dense plasma
observations" , 19th International
Symposium on Heavy Ion Inertial Fusion,
Hotel Shattuck Plaza, Berkeley (USA),
2012 年 8 月 17 日

Toru Sasaki, Yasutoshi Miki, Fumitaka
Tachinami, Hirotaka Saito, Takuya
Takahashi, Nobuyuki Anzai, Takashi
Kikuchi, and Nob. Harada, "X-pinch
Diagnostic for Warm Dense Matter and
Pulsed-power Developments in Nagaoka
University of Technology", 19th
International Symposium on Heavy Ion
Inertial Fusion, Hotel Shattuck Plaza,
Berkeley (USA), 2012 年 8 月 17 日

〔その他〕

ホームページ等

<http://pdmhd.nagaokaut.ac.jp>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

原田 信弘 (HARADA, Nob.)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号 : 80134849

(2)研究分担者

菊池 崇志 (KIKUCHI, Takashi)

長岡技術科学大学・大学院工学研究科

・准教授

研究者番号 : 30375521

阿蘇 司 (ASO, Tsukasa)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号 : 30290737

佐々木 徹 (SASAKI, Toru)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号 : 90514018