

パルスパワー計測技術の進展 —短波長光源から核融合まで—
Progress of Pulse Power Diagnostics
 — from EUV Light Source to Nuclear Fusion —

堀岡 一彦
 Kazuhiko HORIOKA

東工大
 Tokyo Institute of Technology

【大電力パルスパワー技術と粒子ビーム核融合】

1980年代の初頭から1990年にかけて、軽イオンビームを用いた慣性核融合が注目され、活発に研究された時期があった[1]。関連する研究者たちは、パルスパワー装置で駆動される高強度の軽イオンビームで高エネルギー密度プラズマを形成し、燃料標的を爆縮加熱して核融合の点火条件を達成することを目指した。なかでも、当時の米国や旧ソ連では高強度のビームを発生させるために超大型のパルスパワー装置が稼動しており、TW（テラワット）級の軽イオンビームの発生と収束を目指した研究開発にしのぎを削っていた。

軽イオン核融合には非常に低インピーダンスのパルスパワー電源が必要であった。たとえば、プロトンビームで核融合標的を駆動しようとする、標的へのエネルギー付与の領域を爆縮に適した飛程に設定するために、加速電圧はMV程度に抑える必要がある。一方、TW級の高出力電磁パルスとビームを発生させるためにはTW/MV=MA級の電流が必要であり、(MV/MA)~1Ωレベルの低インピーダンス（大電流）の電磁パルスを伝送できる導波路が要求された。

低インピーダンスの電磁パルスを発生するには誘電率の高い媒体が必要になる。大電流の軽イオンビームを駆動するパルスパワー装置には、純水（ $\epsilon_r \sim 80$ ）を媒体としたパルス形成線路が用いられていた。軽イオンビーム核融合の研究に取り組んだものにとって、パルスパワーとは、電磁エネルギーを低インピーダンスの（水）パルス形成線路を用いて100nsec程度に短パルス化・整形して輸送、超高パービアン（加速電圧に対する電流が大きい）のビームに変換して標的照射する技術のことを意味していた。

MV級の電圧とMA級の電流を発生する装置や、誘電率の高い水中でそれらの値を正確に計測する器具をカタログ品として調達することは不可能で、パルスパワー発生装置と計測器とは、一体で設計製作するのが通常であった。実際、パルスパワー装置は単純な構造なので、レーザーや加速器に比べるとずっと安価で、中型の規模の装置で

あれば、自作することはそれほど難しくなかった。

現在では、粒子ビーム慣性核融合のドライバーは、重イオンやさらに重い粒子を媒体とするものにシフトしており、加速装置やこれを支えるパルスパワー技術も多様化している。また、短波長の光源プラズマなどへの応用の拡がりに伴って、パルスパワー技術や電磁パルスエネルギー技術と定義される分野の特徴的な時間スケールは、 μ 秒以上にまで拡大している。

【パルスパワー計測の特徴】

低インピーダンス（大電流）の電磁パルスで駆動されるプラズマ計測の特徴として、ノイズ環境の厳しさがある。適切な遮蔽をしないと、プラズマを生成する過程に伴って負荷以外の空間にも電磁波が漏洩する。また、適切な場所を低インピーダンスで（一点）接地しないと、大電流パルスは装置の様々な部分に電位の寄生振動を誘起して測定系に障害を及ぼす。

計測器の周波数特性と測定感度とはトレードオフである。周波数特性を高くしようとすると、一般に測定感度は下がる。言い換えれば、パルスパワープラズマの計測の際には、それらの障害（ノイズ）を抑制すると同時に、測定対象の計測に必要な周波数特性を損なわない範囲で信号レベルを向上させるように心がける必要がある。パルスパワー計測の際には、自作可能な利点を生かして、計測器の感度と周波数領域を柔軟に対応させることを行う。

【パルスパワー駆動高エネルギー密度プラズマ】

パルスパワー装置を用いて形成される高エネルギー密度プラズマは、レーザーや大型の加速器を用いて生成されたものと比べて時間と空間のスケールが大きいことが特徴である。さまざまな時間・空間スケールを持つ、幅広い温度・密度領域のパルスパワープラズマは、天体現象の理解や核融合から半導体リソグラフィを目的とした短波長のプラズマ光源応用まで、科学と技術の広い分野で利用されている。

エネルギー密度の高いプラズマを形成するには、パワーを空間的・時間的に収束させることが

必要であり、高出力レーザー、ハイパワーイオンビーム、パルスパワーが形成手段として用いられる[2]。高出力レーザーやハイパワーイオンビームも基本的には商用電力からパルスパワー技術を用いて変換されたものであり、パルスパワーは「高エネルギー密度プラズマ」を形成するための基本的な技術ともいえる。

パルスパワー技術を用いて生成されたプラズマのエネルギー密度は、レーザーによって生成されたものと比べると高くはないが、惑星科学や核融合炉工学で重要な課題となっている Warm Dense Matter と称される未解明で興味深い物質状態を形成できる[2]。WDM の内部では、物質の相変化や、励起、解離、電離、などが共存し、大変複雑で定式化が難しい状態が形成される。レーザーを用いれば、そのような状態は簡単に実現できるが、レーザー照射された高エネルギー密度状態のプラズマには、一般に非対称・非定常で複雑な構造が形成される。そのような状態を作ることはできても、測定条件をしっかりと定義して測ることは容易ではない。

複雑な状態を調べるためには単純な幾何学的構造が有利である。また、高エネルギー密度プラズマを精度良く計測し、振舞いそのものを調べることを目的とするとき、プラズマの空間的・時間的なスケールは大きいほど有利である。パルスパワー技術を用いると、対称性と均一性に優れ、大きなスケール持つさまざまな幾何学的形状のプラズマを生成することが可能という利点がある。そのような状態を Well Defined (良く定義された) と表現することがあるが、パルスパワーは入力条件を工夫することによって均一で幾何学的に対称で、良く定義された状態のプラズマを実現できることが大きな長所である[2]。

【自作が可能なパルスパワー実験装置】

実験装置も計測器も基本的に自作でき、簡単に高エネルギー密度プラズマ実験を立ち上げることが可能なのがパルスパワー方式の特長である。図1に μ 秒級の自作パルスパワー電源を用いて形成された WD プラズマの例 (高速カメラで撮影した水中細線ワイヤー放電の典型的なストリーク像) を示す。パルスパワーで駆動されて爆発的に膨張するワイヤー物質は水中に衝撃波を駆動しながら、少なくとも数マイクロ秒に亘って安定に軸対称性を保つこと、電圧・電流の履歴や流体的な挙動は非常に再現性が良いことが確認されている。軸対称で均一な状態を実現できると、プラズマを流れる電流と両端の正味の電圧を測定することによって、入力エネルギーと同時に抵抗値の変化を簡単に測定することができる。また、水のタンパー効果によって径方向の運動が束縛されるために、軸対称プラズマ径の時間発展と温度の情報を μ 秒にわたって得ることができる。

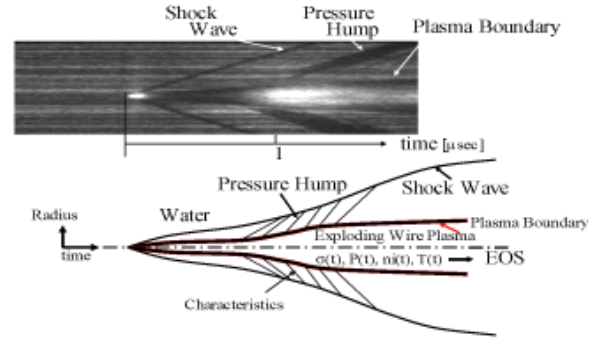


図1 水中ワイヤーのパルスパワー放電によって駆動される高エネルギー密度プラズマと衝撃波の時間発展

再現性が良いと放電条件を変えることによって得られた多くのデータを、再構築することによって WD 状態の物質の導電率を密度の関数として幅広い領域で評価することができる。たとえば、Cu や Al を媒体としたとき、温度一定 (5000K) の条件のもとでは、格子間隔が常圧下の固体の 3 倍程度に広がった時に導電率が極小値をとることを示唆する結果が得られており、最近の分子動力学計算の結果と一致している。

放電プラズマによって駆動される流体挙動はワイヤーへのエネルギー投入履歴と対応する圧力の履歴を反映している。実験で観測された流体挙動と適切な状態方程式を導入した流体シミュレーションとを比較することによって、WDM の状態方程式を半実験的に逆解析することが可能である。逆解析を行うには、均一性が保たれていると同時にできるだけ単純な幾何学的形状で、安定でよく定義された物質の状態の形成が必要であり、パルス水中細線放電プラズマは有力なテスト問題を提供できる。

装置や計測器を自作して試行錯誤することは、研究の基本の一つである。パルスパワー分野では、電圧や電流測定をはじめとして、高エネルギー密度プラズマ実験に基本的な計測法は確立しているが、新しい計測を工夫することから新しい発見が生まれる。分光測定や粒子測定を工夫して温度や圧力が高精度に評価できれば、様々な物質の状態方程式の定式化やスケージングが可能となる。

自作が可能な高エネルギー密度プラズマ実験に魅力を感じた方は、新しい装置と計測器を工夫して、高エネルギー密度プラズマの科学に是非挑戦していただきたい。

References

- [1] C.Deutch, Inertial confinement fusion driven by intense ion beams, ANNALES DE PHYSIQUE, pp.1-111 (1986).
- [2] 堀岡一彦: パルスパワー技術に基づいた高エネルギー密度科学の展開, 日本物理学会誌, Vol.67, No.4, (2012).