

小特集 企業による核融合研究の最近の動向

5. ジェネラルフュージョン社における衝撃波磁化標的核融合開発

5. General Fusion Development Program for Acoustic Magnetized Target Fusion

LABERGE Michel

(原稿受付：2016年9月15日)

General Fusion (GF) 社は、衝撃波磁化標的核融合 (MTF) により核融合炉開発を進めているカナダ企業である。圧縮空気ピストンで音響圧力波を発生させて、液体金属中に生成したスフェロマックを圧縮し、核融合条件の達成をめざしている。本章では、GF 社によって開発された装置・技術や現在の取り組み状況を中心に解説する。

Keywords:

magnetized target fusion, conductive liner, compact torus injection, plasma compression

5.1 はじめに

ジェネラルフュージョン (General Fusion, 以下 GF) 社は、磁化標的核融合 (MTF: Magnetized Target Fusion) により温暖化ガスや放射性廃棄物のない発電方法の開発を行うカナダの民間企業である。2002年に設立され、これまでにベンチャーキャピタルやカナダ政府、民間企業などから、1億ドルの投資を得ている。

MTF は、磁場閉じ込め核融合と慣性核融合の中間に位置する。コンパクトトロイド (CT) プラズマによる標的を繰り返し生成し、導体ライナーの慣性により核融合条件まで圧縮するパルス方式である。MTF によりローソン条件 [1] を満たすためには、慣性核融合よりは低い 10^{26} ions/cm³ のピーク密度と MCF より短いおよそ 100 μ 秒の閉じ込め時間が必要とされる。この閉じ込め時間は、標的プラズマ中の不安定性の成長時間よりも短く、また圧縮装置に要求される電力も低減される。

MTF の研究は、1970年代に米国・Naval Research Laboratory が LINUS program においてその先駆的研究を開始したことに端を発する [2, 3]。液体金属ライナーは、従来の核融合研究において、排熱やトリチウム増殖、構造部材の中性子束 (からの保護) のために提案された。LINUS プロジェクトでは、CT プラズマ標的を生成し、これを液体金属中に形成された円筒状の真空の空洞に入射することが計画された。この空洞は、液体金属を回転させることで中央に生じる渦により形成される。プラズマ標的は、高速で駆動するヘリウム隔離弁により空間を圧潰することで圧縮される。この液体ライナーは、本質的に圧縮過程を繰り返し可能にするが、1970年代の技術では、熱的な寿命 (thermal lifetime) の間にライナーをプラズマの圧縮に十分な速度まで加速することができなかった。

5.2 General Fusion 社の衝撃波磁化標的核融合 (MTF)

GF 社のコンセプト [4, 5] は、LINUS のアイデアを元にしたものであるが、ミリ秒以上の時間で液体金属ライナーの圧力を上昇させ CT プラズマを圧縮するのではなく、音響圧力波により 200 μ 秒以下で圧縮する。これを実現する可能性のある装置構成の一例を図 1 に示す。これは、リチウムと鉛の共融液体合金 (Pb-16Li) で満たされた球状の容器、球状容器の一方または両方の極に設置されたプラズマ入射装置、そして、容器表面に径方向に配置された圧縮空気ピストンによって構成される。球殻内の液体金属は、中心軸上に、球状容器の両極まで伸びる空洞を伴う渦を形成するために回転している。ピストンは球状容器に衝撃を与え、中心に向かって収束する音響圧力波を形成する。重水素と三重水素により形成された CT プラズマは、球状に収束する圧力波が渦の境界面に達する直前に、渦の中心に向かって入射される。液体金属は、その導電性により、プラズマ中の磁場が漏れ出すのを防ぐ磁束保持容器としてはたらく。圧力波が空洞を圧潰すると、プラズマ標的は圧縮加熱され、核融合条件に達する。D-T 核融合反応は、3.5 MeV のアルファ粒子 (20%) と 14.1 MeV の中性子 (80%) としてエネルギーを解放する。このエネルギーは、液体金属ライナーに熱として吸収される。

圧縮空気ピストンは、圧縮された空気または蒸気により加速される。各ピストンは、高速駆動ブレーキ付きのサーボコントロールシステムを有し、ピストン毎の駆動タイミングを制御している。このようなサーボは LINUS が検討された 1970年代には存在しなかった。この圧縮空気ピストンを MTF ドライバーの動力源として用いることには 2つの利点がある。第一に、100 MJ に達する圧縮空気の蓄積エネルギーは、1 ジュールあたり 20円以下という低コストを容易

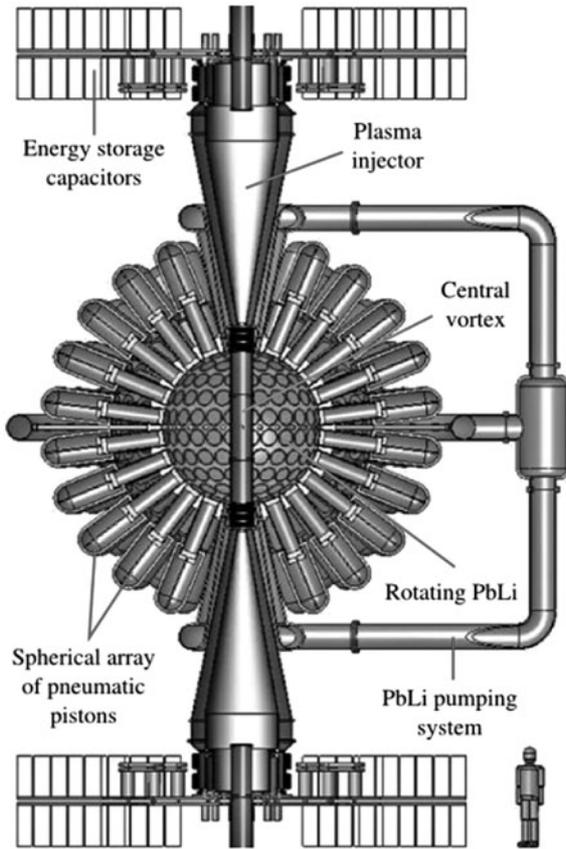


図1 MTFシステムのご概念図。

に実現する。これに対して、プラズマ生成に使用される高電圧キャパシタでは、1ジュールあたりのコストが200円を超える。第2に、炉の熱交換システムにおける動作ガス（蒸気、二酸化炭素、及びヘリウム）は、直接ピストン群の駆動に使用でき、電力を介したエネルギー変換による損失を削減できる。

ピストンの衝撃は、液体金属中を伝播する50–100 MJの音響パルスを生成する。秒速100 mで作動する鋼鉄製のピストンは、インパクト時に2 GPaの圧力を発生する。ピストンから液体金属へのパルス伝達効果は、音響インピーダンス比に依存する。鋼鉄と溶融鉛は同程度のインピーダンスを持つため、90%以上のエネルギーが鉛に伝達される。

個々のピストンで生成された圧力波は、球の中心へ伝播する1つの圧力波に集束する。球状に集束することで、圧力強度は半径に反比例して増大する ($P \propto 1/r$)。直径3 mの球において、パルスは700 μ 秒間で集束し、10 GPa以上に達する。CTプラズマを取り巻く磁束保持渦は100 μ 秒で圧潰し、CTを径方向に約1/10に圧縮する。これは、ピークにおいて10 TWの加熱に相当し、プラズマに10 MJのエネルギーを注入する。圧縮が断熱的だとすると、プラズマの密度は 10^{26} ions/ m^3 、温度は10 keVに上昇し、磁場強度は数百 Tに達する。

プラズマが最大に圧縮されている滞留時間はおおよそ10 μ 秒である。この間、プラズマの熱エネルギー閉じ込め時間は約10 μ 秒であり、アルファ加熱はおおよそ2.8 TW、ほぼ制動放射による熱損失は1.58 TWとなる。アルファ粒子

の熱化時間は1 μ 秒で、滞留時間よりは十分に短く、アルファ加熱に代わり圧縮加熱により点火が実現する。核融合燃焼は、圧力波が反射して減圧され燃料が薄まるまで継続する。

D-T核融合反応によって生じた中性子はプラズマを透過し、液体金属ライナーで減速される。中性子はそのエネルギーをライナーに伝達し、リチウムと反応してトリチウムを生成する。トリチウム増殖率はMCNPシミュレーション[6]によると1.5であり、連続運転に必要な燃料を供給できる。このトリチウム増殖は、発熱反応である $6\text{Li} \rightarrow \text{T} + \text{He}$ により追加熱を生じる。

液体金属を再生可能な第一壁として使用することは、炉設計において多くの利点がある。非常に大きな熱負荷を吸収でき、また、中性子やガンマ線曝露から炉の構造物を遮蔽するブランケットとして機能する。鉛は鋼鉄と音響インピーダンスがよく一致し、大きな質量はCTの圧縮に必要な慣性を与える。Liは中性子を抑制、吸収しトリチウムを増殖するのに必要である。液体金属ライナーは発電のために熱をタービンへ伝達するためにも用いられる。熱交換システムを通過後、冷却された液体金属は容器に戻され、球の軸上に円筒渦を形成するため接線方向に入射される。

流体力学的不安定性は、CTの対称的な圧縮を妨げかねない。これらの不安定性には、初期渦の境界面に生じる波によって発生するRichtmyer-Meshkov (R-M) と Rayleigh-Taylor (R-T) 不安定性が含まれる[7]。この境界面は、プラズマ圧力が最大圧縮に近い状態で壁を減速しない限り、R-Tに対して安定である。7.5 μ 秒の減速期間の間、R-T不安定性は15倍に増幅する[8]。したがって、初期の壁表面の変調は1%以内である必要がある。

商業応用においては、このプロセスが1 Hzで繰り返される必要がある。このサイズの核融合炉を1 Hzで繰り返し運転することで100 MWの出力を得ることができる。

5.3 研究開発プログラム

この概念設計は、未開発の技術に強く依拠している。したがってGF社は、このMTFアプローチの実現可能性を証明するため、集中的な研究プログラムを遂行している。商業化が検討される前に、GF社の概念炉の主要なシステム開発が行われなければならない。これには、音響ドライバーシステム、プラズマ入射装置、そしてプラズマ圧縮システムが含まれる。この開発の主要な目標は以下の通りである：

1. 基盤となるシステムの開発を推進するため、構成システムをリアクターサイズで建設、試験；
2. MTF圧縮過程での磁化プラズマの振る舞いを検証するための実験的なCT圧縮；
3. さらなるシステムの最適化のため、実験に適合したシミュレーションモデルやツールの開発

プラズマ入射装置は、プラズマ標的を生成し、熱エネルギー閉じ込め時間である100 μ 秒以上の間、密度 10^{23} / m^3 、温度100 eVのプラズマを閉じ込める必要がある。音響ドライバーは、インパクト時刻を ± 10 μ 秒以内に制御しながら

ら、ピストンを 50–100 m/s に加速でき、さらに繰り返される衝撃ストレスに耐えなければならない。最も重要なのは、プラズマが金属壁とともに 10^{26} m^{-3} の密度、10 keV の温度まで、対称性を破る不安定性を生じずに圧縮できることを実証することである。

これらの開発事項は、コンピュータシミュレーションにより支援される。MTF は一般的なプラズマ物理学の理論により記述されるが、現行の計算モデルは MCF や ICF を想定している。MTF は複合的であり、両者のシミュレーションの特徴を必要とする。したがって、物理的な正確さを再現するツールを製作するため、ソフトウェアの開発も進められている。

5.4 音響ドライバーシステム

概念炉における圧力波は、球状容器に径方向に配置された圧搾ピストン群により形成される。各ピストンは、円筒内腔を加速され端部に取り付けられた浮遊鉄床に衝撃を加えるハンマーピストンにより構成される (図 2)。鉄床は球状容器壁内で、ハンマーと液体金属に挟まれており、その内壁は液体金属に接している。

ハンマーピストンと鉄床は円筒状で硬化した工具鋼で作られている。鉄床のインパクトの際に、わずかに液体金属側へ変位し元の位置に戻る。ハンマーピストンの加速のため、ハンマーと鉄床の間の空隙は真空排気され、圧縮空気がピストンハンマーの背後から入射される。光学エンコーダがハンマーピストンの位置を測定するために用いられる。この位置情報は、サーボ制御システムへ送られ、ピエゾ駆動摩擦ブレーキがインパクトタイミングを $10 \mu\text{s}$ 以内の精度で制御する。

このドライバーの、熱エネルギーからピストンの運動エネルギーへの変換効率はおおよそ 33% である。良質な鋼鉄は 3 GPa に達する圧力下でも使用でき、したがって、1 つのピストンが 50–100 MJ のエネルギーを供給できる。これらのデバイスの信頼性を実証するため、GF 社では多くのフルスケールのピストンを製作しテストした。試験は温度がいかに上昇するか、液体金属との接触、鉄床表面でのキャビテーションがピストンの耐久性に与える影響を測定するために続けられた。

5.4.1 小型球殻 (Mini-Sphere)

Mini-Sphere は、直径 1 m の溶融鉛で満たされた球殻であり (図 3)、液体金属渦圧縮システムの縮小試作機である [9]。これは、球殻の様々な部材の構造を検証し、複数のピストンが稼働した際の装置の機械的健全性を評価すると

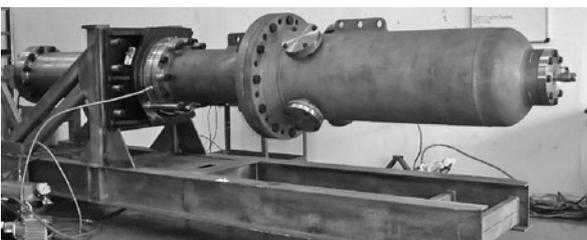


図 2 単一ピストンの写真。

ともに、渦の物理過程とピストンの同期を試験するために製作された。

鉛ポンプ・貯蔵システムは 15 トン溶融鉛を貯蔵でき、100 kg/s の質量流量を保持できる 25 kW の MHD ポンプを有する。液体鉛は球殻の内部へ排出され、直径およそ 78 mm の円筒状の渦を球の中心に形成する。

7 つのピストンが 2 つのリング状にアレンジされ、合計 14 のピストンが球殻を囲んでいる。ハンマーピストンの同期された鉄床への衝撃は、液体鉛を進行する音響波を形成し、渦を圧潰する。渦の内壁は様々な運転条件において、対称的に圧潰していることが観測された。

5.5 プラズマ入射装置系

GF 社におけるプラズマ入射装置開発プログラムでは、実験用の小型装置とリアクタ用の大型装置の開発が平行に進められている。いずれの入射装置も、同軸ヘリシティ入射 (CHI) [10] により液体金属渦へ入射される CT を生成する。MTF におけるプラズマ標的は、圧縮時に磁場コイルのようなプラズマ中心を貫く支持構造を持っていないため、自己組織化磁場閉じ込めプラズマである必要があり [11]、spheromak か FRC が使用可能である。コンパクトトーラスの厳密な定義からは外れるが、CT の軸上に液状の導電体軸を持つことができる球状トカマクも対象となりうる。

5.5.1 大型入射装置

GF 社において開発されている大型の入射装置 [9, 12, 13] は、RACE [14] や CTIX [15]、MARAUDER [16] のような 2 段式の装置である。それらは、コンパクトトーラスを同軸ヘリシティ入射によって生成し、テーパのついた円錐部を通過して加速されることで密度と磁場強度が増大する (図 4)。各入射装置は、全長 5–8 m、高アスペクト比 ($R/r = 4.4$) スフェロマックが最小の $\lambda = 9 \text{ m}^{-1}$ で生成される拡張部で直径 2 m である。加速部は、射出口で約 0.4 m まで絞られる。

CT を生成するため、一組の直流ソレノイドが電極間に径方向磁場 (stuffing flux) を形成する。重水素またはヘリウムのパフが、50 個の円環状に配置された高速駆動ガスバルブによって生成領域に噴射される。0.5 MJ のキャパシタ

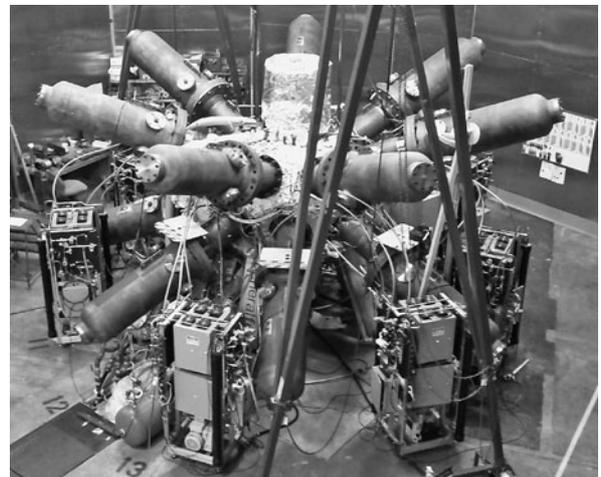


図 3 小型球殻 (Mini-Sphere)。

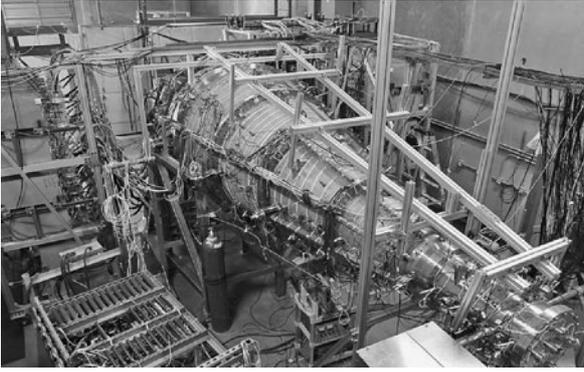


図4 大型プラズマ入射装置の写真。

バンク (23 modules at 22 kV) が、ガスを電離するために電極間で放電される。プラズマ中を流れる電流がトロイダル磁場を形成し、磁気圧の勾配がプラズマを軸方向に加速するローレンツ力 ($F_z = j_R B_\phi$) を生じる。プラズマが前方に進むと生成磁場と作用し、プラズマが拘束されなくなるまで、磁力線をひずませ引き伸ばす。ダイナモを無視すると、生成されたCTは、電流によるトロイダル磁場を持ち、stuffing flux との相互作用によりポロイダル磁場を生じる。生成後のプラズマパラメータは、容器壁のゲッターリングなしで、大半径が $R=1\text{ m}$ 、密度 $n=10^{21}\text{ m}^{-3}$ 、ポロイダル磁場 $B_{\text{pol}}=0.4\text{ T}$ 、また 温度 $T_e = T_i = 60\text{ eV}$ である。

2段目の1.13 MJ キャパシタバンク (24 modules at 44 kV) は、CTを円錐ガンへ加速するために用いられる。CTは秒速100 kmで移送され、径方向に約1/5まで圧縮され、密度、温度、磁場強度を増大する。これは、プラズマが完全電離し、線スペクトル放射が最小である状態を維持する。加速後、CTは密度 $n=10^{23}\text{ m}^{-3}$ 、温度 $T_e = T_i = 200\text{ eV}$ 、熱閉じ込め時間 $100\text{ }\mu\text{s}$ 、磁束密度 $B=5\text{ T}$ 、大半径0.2 mとなる。

過去にCTを端部のテーパ領域まで加速する実験を行なったが、トロイダル押圧磁場はCT構造内に拡散し、磁気面を壊して閉じ込め性能を劣化させた。現在設計中の第3世代の入射装置は、ガンのテーパ比にキャパシタバンクからの電流が釣り合うようにデザインされている。

プラズマ入射装置は、ミルノフプローブ、駆動回路のロゴスキーコイル、 $1.4\text{ J}\cdot 532\text{ nm}$ レーザーによる単点トムソン散乱、 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ ダイオードレーザーによるファイバー干渉計、イオンドップラー分光、真空紫外分光器、可視およびX線ダイオード、中性子シンチレータ、リチウム-ニオブ酸ポロメータなどの多数の計測器が取り付けられている。さらにファイバーバンドル経由でプラズマ像を直接観測するため高速度カメラ (Phantom V711) も用いられている。

グランドループを避けるため、通信規格のプラスチックファイバーが、実験用の制御信号やトリガ信号と同様に、計測データ信号をスクリーン室へ伝送するのに使用されている。計測信号はGF社でデザインされた光学入力デジタルボードに入力される。1ショットあたり100 MBのデータが生成される。

5.5.2 小型入射装置

小型の入射装置であるMRT (Magnetized Ring Test) とSPECTOR (SPhErical Compact TORoid) は、圧縮過程におけるプラズマ安定性を、移設可能な設備内で明らかにする目的で開発された[17]。HIT[18]、NSTX[19]、SSPX[20]、そしてHIST[21]と同様に、これらの装置では、CTは磁束保持容器内で直接生成される。重水素ガスは底部に取り付けられた8つの圧電パフバルブによって装置内に入射される。20 kVにまで帯電した3000 μF のキャパシタバンクの放電とともにプラズマが生成され、磁束保持容器内にトロイダル磁場が入射される。初期封入磁束は10–30 mWbである。CHIが一旦終了すると、プラズマ内の磁場は素早く再結合しCTを形成する。

固体アルミニウム容器がCTの真空容器と磁束保持容器として用いられる。MRTでは、磁束保持容器は0.15 m径の円筒で、CTの大半径は0.105 mである。一方SPECTORは、0.19 m径の球形でCT大半径は0.12 mである(図5参照)。両者の大半径は同程度であるが、プラズマ体積はSPECTORの方が3倍大きくなる。いずれも、プラズマが断熱圧縮されれば、核融合反応を起こすには十分な大きさであるが、正味のエネルギー利得を得るには不十分である。

小型の入射装置内のCT密度は $5\times 10^{20} - 10^{21}\text{ m}^{-3}$ である。MRTでは、電子温度が100–200 eVであり、熱的な寿

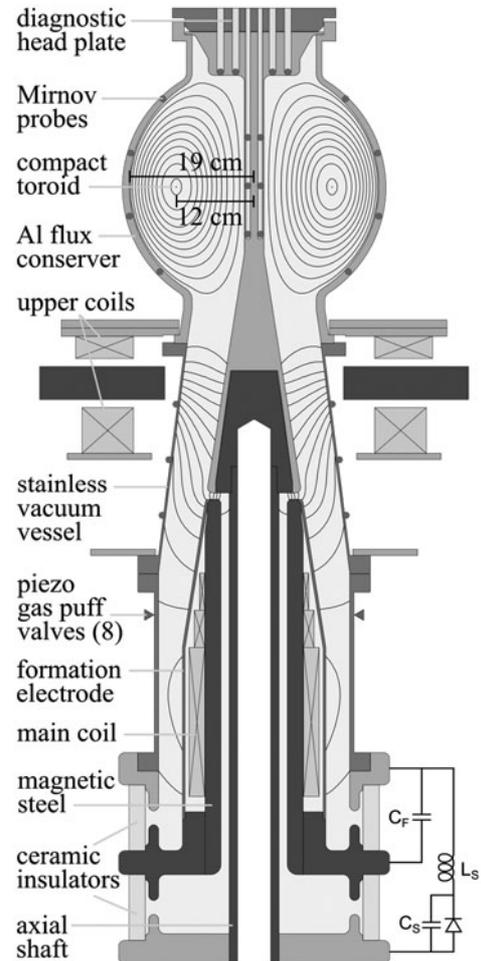


図5 SPECTOR プラズマ入射装置図。

命は 50μ 秒、磁場の寿命は 500μ 秒である。また一方、SPECTOR の場合、電子温度は $300-400$ eV、熱的寿命は 100μ 秒、磁場の寿命は $1,200 \mu$ 秒である。温度は小型プラズマ装置としては高く、リチウムゲッターリングを含む壁コンディショニングが奏功していると考えている。

MRT 装置は、ミルノフプローブ、ロゴスキーコイル、単点トムソン散乱、光ファイバーで構成された干渉計、イオンドップラー分光装置、VUV 分光計、可視および X 線光ダイオード、中性子シンチレータ、リチウムニオブ酸ポロメータなど、プラズマ入射装置として一般的な計測系を備えている。さらに、我々は CCD カメラを開発した。これは、P46 蛍光体を塗布しさらに 15 eV 以上をカットするため 50 nm のアルミニウムを上塗りした窓へ、X 線を 1 mm 径のピンホールから取り入れ、撮像できるものである。

SPECTOR 装置では多くの新たな計測法が開発された。トムソン散乱系を 6 点アレイへと改良した。また、CT のトロイダル磁場によるファラデー回転を計測するため 4 弦偏光計を使用している。

5.6 プラズマ圧縮システム

急激な収縮場における CT の振る舞いは、MTF が核融合条件まで達成できるかを定める上で、問題となる。磁気エネルギーや熱エネルギーが保存しながらプラズマは断熱圧縮するのか、また不安定性によってエネルギー損失が起こるのか、わかっていない。プラズマの振る舞いを調べるため、GF 社は液体金属の取り扱いを避けることができる爆発駆動プラズマ圧縮システムを開発した。

これら PCS (Plasma Compression -Small) 試験用 CT プラズマを生成するため小型プラズマ入射装置が利用される。無圧縮ショットと同じように、CT は固体アルミニウム磁束保持容器内で生成される。ただしこの実験においては、磁束保持容器には爆発物が巻き付けられ、 1.5 km/s の速度で駆動することになる。爆発物は外壁に設置され、中心軸に向かって外壁を押し縮める。これによって熱的な寿命より早く、圧力衝撃波の伝達時間と同程度と見積もられる 100μ 秒間でプラズマが圧縮される。磁束保持容器の軌跡は、実験およびシミュレーションによって求められ、爆発ガスの混入ならびにそれに伴う急激な温度低下を阻止するようにしている。中心シャフトの形状は、CT がシャフトと移動壁との間で、最大限に押しつぶされるように決められる。プラズマ計測系は実験終了時まで破壊されないように注意深く設計されている。このようにして CT の安定性と圧縮加熱を調べている。

PCS システムはプラズマ入射装置、そのキャパシタバンク、さらには計測系で構成される。これらの全ては、輸送と設置を容易にするため標準サイズの船積みコンテナ内にまとめられている。PCS 試験は爆発圧縮試験のために人里離れた実験室外の区域で行われる。磁束保持容器とそれに取り付けられた計測系を除き、プラズマ入射装置などそれ以外の全ての部分は、強化容器の爆破遮蔽体の中で十分に保護され、ほぼ全てが数多くの圧縮試験に再利用可能である。

執筆時の現在、14 回の圧縮実験がこれまでになされている。全ての爆発実験で、磁束保持容器が内部シャフトに衝突するまでの実験データを取得している。これらの実験結果により、プラズマベータの上昇、移動壁との様々な相互作用、圧縮中の外部磁場制御、などの効果を定量化できる。商用炉の設計に爆発物を利用できないのは明らかであるが、圧縮過程における磁化プラズマの振る舞いを確認するには比較的迅速で手頃な方法と言える。継続的に行われる我々の実験は、設計や技術の改良をもたらすこの素早い展開からの恩恵を受けている。

5.7 数値シミュレーション

GF 社での研究は、多くのシミュレーションとシミュレーションチームによって開発されたモデルの支援を受けている。CT 生成、加速、および圧縮の電磁流体力学 (MHD) シミュレーションは主として VAC (Versatile Advection Code: フリーの MHD コード) [22] を用いて行っている。VAC は保存型の衝撃波捕獲コードで 2 次元および 3 次元の一般座標系において単一流体 MHD 方程式系を解くことができる。我々が加えた主たる修正は、外部回路との連成解析、マルチブロック構造格子、磁場に平行な非等方熱伝導、そして移動メッシュ、などである。

我々が精力的に利用している他の MHD コードは NIMROD (Non-Ideal Mhd with Rotation-Open Discussion) [23] である。NIMROD は、ポロイダル二次元平面におけるスペクトル有限要素離散化法、トロイダル方向の有限フーリエ展開、さらに陰的時間離散化法、などを用いて拡張 MHD 方程式を解く。また、二流体効果、運動論効果、ホール項のような様々な拡張物理を盛り込んでいる。NIMROD は、線形化された方程式系や、我々は現在、生成・発展シミュレーションや線形安定解析に NIMROD を用いている。移動メッシュ機能については現在開発中である。

MHD シミュレーションは、Corsica [24] や DCON [25] など複数の平衡・安定性ソルバーの支援を受けている。これらは、2 次元 Grad-Shafranov 方程式を解き、与えられた真空容器構造、外部印加磁場、電流、および圧力分布と矛盾のない理想 MHD 平衡を得る。MHD シミュレーションの初期条件は Grad-Shafranov ソルバーを用いてしばしば作られる。MHD 結果の安定性は理想および抵抗性安定性ソルバーで二重チェックされる。

プラズマシミュレーションに加えて、音波や圧縮のモデル化のため流体力学シミュレーションも行う。LS-DYNA はマルチフィジックス (複数の理論枠組み) や、爆発物と構造物の相互作用が含まれる動的有限要素コードである。電磁気的影響や爆発的加速の影響の下、真空容器壁の軌跡をモデル化するのに用いられる。最後に OpenFOAM® (Open-source Field Operation And Manipulation) は、流体力学ソルバーのライブラリーである。渦圧縮の流体力学と同様にピストンの構造力学をモデル化するために利用される。

5.8 実証炉をめざして

GF 社は実証炉をめざして研究を進めている。実物大の

サブシステムが開発・製造されれば、実証炉は建設されるであろう。実証炉は単パルス装置であり、純重水素燃料を用いることで一日数回運転することができる。試験期間終了に向かって、点火を実証するために燃料は D-T へと切り替えられる。実証炉の主目的は、運転領域の最適化と単パルスでのエネルギーバランスの計測である。信頼性確立の後、次期炉ではプラントシステムのバランスや送電網への電力供給を含む研究が行われる。

(翻訳：浅井朋彦)

参考文献

- [1] J.D. Lawson, "Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor", Proc. Physical Society Section B, **70**, No. 1 (1957).
- [2] D. Dudzick, "Nucleonic aspects of the LINUS imploding blanket", *ANS Meeting on the Technology of Controlled Thermonuclear Fusion*, 9 May 1978.
- [3] R.L. Miller and R.A. Krakowski, "Assessment of the slowly-imploding liner (LINUS) fusion reactor concept", *4th ANS Topical Meeting on the Technology of Controlled Nuclear Fusion*, 14-17 October 1980.
- [4] M. Laberge, *J. Fusion Energy* **27**, 65 (2008).
- [5] M. Laberge, *J. Fusion Energy* **28**, 179 (2008).
- [6] X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - Version 5, Vol. I: Overview and Theory", LA-UR-03-1987 (2003).
- [7] V. Suponitsky *et al.*, *Comp. Fluids* **89**, 1 (2014).
- [8] K. Fowler, LLNL Report UCRL-ID-135551 (1999).
- [9] M. Laberge *et al.*, *IEEE 25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE)*, 2013.
- [10] M. Ono *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **44** 393 (1980).
- [11] P. M. Bellan, *Spheromaks: A practical Application of MHD Dynamos and Plasma Self-Organization* (Imperial College Press, 2000).
- [12] S. Howard *et al.*, *J. Fusion Energy* **28**, 156 (2008).
- [13] M. Delage *et al.*, *33rd Annual Conference of the Canadian Nuclear Society Proceedings*, 2012.
- [14] J.H. Hammer *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2843 (1988).
- [15] D.Q. Hwang *et al.*, *J. Fusion Energy* **26**, 81 (2007).
- [16] J.H. Degnan *et al.*, *Phys. Fluids* **B5**, 2938 (1993).
- [17] A. Froese and *et al.*, "Spheromak Compression Experiments at General Fusion", *19th Pacific Basin Nuclear Conference Proceedings*, pp. PBNC2014-234, 2014.
- [18] B.A. Nelson *et al.*, *Phys. Plasmas* **2**, 2337 (1995).
- [19] R. Raman *et al.*, *Nucl. Fusion* **41**, 1081 (2001).
- [20] E.B. Hooper *et al.*, *Nucl. Fusion* **47**, 1064 (2007).
- [21] M. Nagata *et al.*, *Phys. Plasmas* **10**, 2932 (2003).
- [22] G. Tóth, *Astrophys. Lett. Commun.* **34**, 471 (1996).
- [23] C.R. Sovinec *et al.*, *J. Comp. Phys.* **195**, 355 (2004).
- [24] J.A. Crotinger *et al.*, LLNL Report UCRL-ID-126284 (1997).
- [25] A.H. Glasser *et al.*, *Phys. Fluids* **18**, 875 (1975).