

■ 展 望 ■

パルスパワー技術の開発とその将来

(第1部) 核融合

Prospect of the Pulsed Power Technology

Part (1) Fusion

上 野 勲*

Isao Ueno



1. はじめに

エネルギーは文明社会を維持し、発展させるための原動力である。しかし、このエネルギーも多消費と高密度消費から21世紀の初期には世界の天然資源の枯渇とそれに伴う環境汚染が極めて重要かつ深刻な問題になることが指摘されている¹⁾。特に我が国は、資源が乏しく、海に囲まれ、狭隘で、人口密度が高く、高度に工業化され、その技術水準が高い等、特有の条件を抱えており、これらのことを考慮すれば、我が国におけるエネルギーの開発候補は、長期エネルギー源としての条件を具備した高速増殖炉、核融合、並びに太陽エネルギー等を積極的に取り上げねばならないであろう。図-1にその主流エネルギーの変遷を示す²⁾。上記の三候補の中で、核融合は長期エネルギー源として最も有力であるといわれ、それは近い将来科学的に実証されようとしている。しかしそのためには他のどのエネルギー源の開発にも見られない厳しい技術的及び経済的障壁を克服しなければならない。これらの実証を成功させるための未踏の極限技術並びに炉材料の開発等に関連する重要な基礎技術が本文中で述べるパルスパ

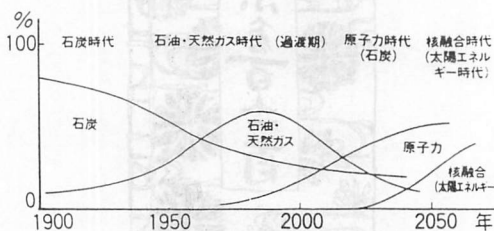


図-1 主流エネルギーの変遷

* 東京大学工学部強力中性子源開発研究グループ・プロジェクトリーダー

〒113 東京都文京区本郷7-3-1 電気工学科内

ワー技術である。

本文はエネルギー資源の開発という立場に立って主として、長期エネルギー源の最も有力な候補であるといわれる核融合(第1部)と、加速器増殖炉(第2部)の開発に求められているパルスパワー技術を中心に、その技術の現状と問題点および展望について述べるものである。

2. パルスパワー

日常生活におけるパルスパワーは落雷という自然現象としてしばしばお目にかかる。因みに、雷の専門家たちの観測結果によると、夏に雷を発生する雷雲の高さは地上数kmの上空で、その雲の厚さは約10km。この雷雲から放つ稲妻の1回の雷撃は電流値で数万A〔アンペア〕、エネルギーにして数十億J〔ジュール〕であるという(図-2参照)。

高電圧工学(IEC規約)で用いられる標準インパルス波形(波頭1.2 μs 波尾50 μs , μs は 10^{-6} 秒)

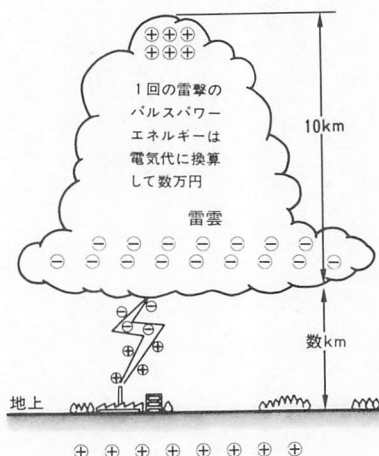


図-2 日常お目にかかるパルスパワー

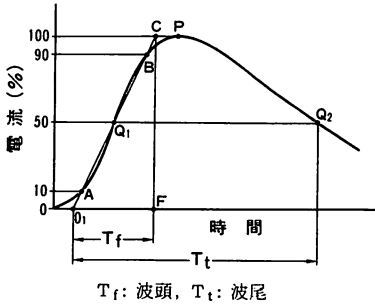


図-3 インパルス波形の標示

はこの雷撃の際に流れるパルス電流波形に起因している(図-3参照)。まさに雷撃こそ、雷雲と数kmはなれた地上間を絶縁破壊し、空気を電離したプラズマ中を数10~数100μs間、アーク電流として地上に供給されるパルスパワーと言える。

2.1 一般的なパルスパワーシステム

パルスパワーシステムは通常ゆるやかに供給されるエネルギーを蓄えて、その後目的に応じた負荷または変換器に対し極めて急速にそのエネルギーを放出することを目的とする。そして、更に目的に応じてパルスの整形、繰り返し率、寿命、信頼性等が要求される。

一般のパルスパワーシステムの基本的な考え方は図-4に示されるように、固有な機能を有するいくつかのブロック(サブシステム)から構成される。

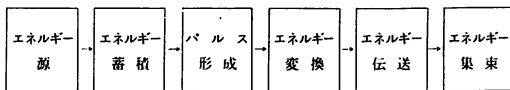


図-4 一般的なパルスパワーシステム

以下(具体的には第4章参照)、同図のブロック図に従って順次述べてゆく。まずエネルギー源は多くの場合商業用電力であるが、例えばこれが、高空または宇宙空間で使用される際には通常小型のタービン駆動発電機等が用いられる。

エネルギー蓄積には、いろいろな形態があるが、基本的には多くの場合、コンデンサの組合せが用いられ、その他に磁気コイルのインダクタ、フライホイール、ある化学的方法等が用いられている。

パルス形成サブシステムは通常コンデンサやインダクタ、それに複数個のスイッチ、あるいは非線形回路素子で構成され、その機能はパルスに対して要求される立上り時間、パルスの長さ等を形成することである。更に蓄積されたエネルギーを効率よく負荷(または変

換素子、以下同様)へ伝送するためには特別なインピーダンス整合も必要となる。これは通常のトランスのように簡単な場合もあるが、一般的には極めて複雑なものになる。スイッチとしてはスパークギャップやイグナイトロンあるいはサイラトロンなどが用いられる。

エネルギー変換ブロックは目的に応じて、電気エネルギーを電磁波や粒子等に変換し、適当なパルスパワーの形態(表1参照)をとらせるためのサブシステムである。ここでは変換関数の規定や変換用ダイオードの設計などが問題となる。

エネルギー伝送ブロックはパルスパワーの形態に応じて、負荷に必要な波形を損失の少ない形、例えば真空、気体プラズマ中等(図-9参照)で伝送させることを目的とする。

エネルギー集束ブロックは、負荷の位置にパルスパワーを集束させるサブシステムである。また、パルスパワーシステムの多並列使用の場合は負荷に四方八方からパルスパワーを集束させるサブシステムとなる。

上記のサブシステムの他にシステムとしての組上げ、仕様として課される制約(例えば重量や容積等)、また接地やシールド、安全性及び診断法等の問題があり、更に電波誘導障害をも常に念頭におかなくてはならない。

2.2 パルスパワー形態の分類

前節のシステムによってパルスパワー化されたエネルギーの形態は電磁波、粒子、電気に分類される(表1参照)。更に電磁波はマイクロ波、レーザー光線、X線等に、粒子は電子ビーム、軽イオンビーム、重イオンビーム、素粒子ビーム、中性粒子ビーム等の形態に細分類される。

表1 パルスパワー形態の分類

パルスパワー	}	電磁波	<ul style="list-style-type: none"> マイクロ波 X線、γ線 レーザー光線
		粒子	<ul style="list-style-type: none"> 電子ビーム 軽イオンビーム 重イオンビーム 素粒子ビーム 中性粒子ビーム
		電気	(電気回路)

3. パルスパワーとその応用分野

3.1 エネルギー領域とその応用分野

種々の形態に分類されたパルスパワー線源*は多方面の分野においてその活用が期待される。

図-5にその応用分野とエネルギー領域を示す。同図は横軸にパルス当りの総粒子数(電荷量 単位 μC : 10^{-6} クーロン)をとり、縦軸に1粒子当りのエネルギーを示したものである。従って、この図で縦軸[MeV]と横軸[μC]の値を掛算するとその値は[J]の次元となりパルス当りの全エネルギーを示す。(以下の文中のエネルギー領域は図-5のそれに対応する)

(1) 非破壊評価

我が国の原子力発電所は建設されてから10有余年を経過し、今日では、なくてはならない電力供給源となっている。この電力の安定供給源として重大な責務を負わされている原子力発電用諸設備における機器、構造物の健全性評価技術としての非破壊検査や材料の非破壊試験用線源のパルス当りのエネルギーは図の $\sim 1\text{J}$ までの領域で用いられる。

(2) レーザ励起

レーザーは日常生活において、光通信、金属加工、医療用等に広く活用されてきている。この一般的な用途に应用されているレーザー励起のエネルギーはパルス当り図-5に見られるように $\sim 70\text{J}$ の領域にある。他方原子・分子レベルの励起を必要とする高出力大型レーザーは、レーザー励起にホモポーラ発電機や、急峻なパルスパワー電源を必要とするので、図-5の核融合等の項目で示される領域に区別されている。

(3) 原子核と素粒子物理の研究

原子核と素粒子(中性子・陽子等)を線源とするパルス当りの全エネルギー領域は、図の 0.05J [$50\text{MeV} \times 10^{-3}\mu\text{C}$] $\sim 1\text{kJ}$ [$2 \times 10^4\text{MeV} \times 5 \times 10^{-2}\mu\text{C}$]の領域であって、原子核、素粒子の研究のために各種

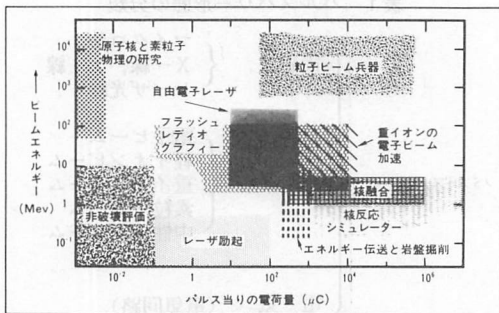


図-5 パルスパワーの応用分野とそのエネルギー領域

脚注 *本文における「線源」とはいろいろなエネルギー形態の波源、光源、ビーム源としてのパルスパワーを総称している。

の加速器が発達しており、これに伴い他に他の分野における応用も進展し、最近では研究用以外の応用の専用加速器も出現するにいたっている。その利用法は加速された荷電粒子を直接用いる場合とそれによって生成された中性子、中間子、X線、 γ 線、放射性同位元素等々の2次放射線を用いる場合とがある。

図-6は粒子のエネルギーとその用途をまとめて示したものである。

この領域における最近の成果の1つは高速中性子線または陽子線のパルスパワーを医療のため患者に照射して、ガン細胞を破壊する手法にある。その原理は高速中性子線が、ガン細胞に衝突したとき短時間に高いエネルギーを放出する特性を応用したものである。従来の放射線では効果がなかった骨肉腫、喉頭ガン、パンコスト型肺ガン、食道ガン等に対して、X線、 γ 線の3~4倍の治療効果を示したと科学技術庁の放射線医学研究所では公表している。

このように、パルスパワー技術を開発してゆき、パルスパワーの形態を重粒子線や、 140MeV の静止エネルギーをもつ負パイ中間子線等に変えていくことによって、これまで手術不能であったガン治療に対して、現在の治癒率60%を更に高い治癒率にしてゆく可能性が出て来たといえる。その理由は、重粒子線や負パイ中間子線は陽子線と中性子線の長所を兼ねそなえているからである。

(4) エネルギー伝送と岩盤掘削

この領域のエネルギーを計算すれば 30J [$1.5 \times 10^{-1} \times 18 \times 10^2$] $\sim 9\text{kJ}$ [9×10^3]となる。この応用は従来の振動型掘削法に較べて作業者の労力を軽減し、またこれによる職業病を皆無ならしめる新工法として期待されるものである。

(5) 自由電子レーザー

この種のレーザーは波長可変で単一波長の大出力レ

軽イオン (α 粒子) (重陽子)	原子核の研究		
軽イオン (陽子)	原子核の研究		中間子の発生 陽子・反陽子 対の発生
ガンマ線 (X線)	透視 結晶構造 研究	電子陽電子 対の発生	原子核 の研究 中間子の発生
電子	真空管 陰極線 回路	ガンマ線(X線)の発生 高分子化合物 の照射	素粒子の研究
	10^2	10^3	10^4
	(1 KeV)		(1 GeV)
	粒子のエネルギー (eV) \rightarrow		

図-6 種々な粒子のエネルギーとその用途

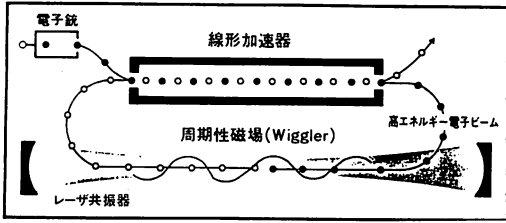


図-7 自由電子レーザの原理

ーザとして、例えば電子工業界への広い応用、標準光源、リソグラフィーとして注目を集めている。この線源のパルス当りの自由電子レーザのエネルギーは30 J~150 kJの領域にある。

その理由は、図-7に見るように線形加速器等で加速された自由電子ビームを Wiggler magnet (粒子を周期的に振らせる磁場) の設置されたレーザ共振器の室内に通すと、自由電子ビームが周期的磁場によって振られ、この振られた時に自由電子が光を放出する。この時、同じ波長の光がくれば、その光が誘導放出によって増幅されることになる。従って、この原理は磁場の強度には関係なく、磁場の周期と電子ビームのエネルギーを可変とすることによって誘導放出によるレーザ光の波長を変化させるものである。エネルギー変換は自由電子のエネルギーを光のエネルギーに変換する方式で理論的変換効率極めて高く約50%ともいわれている。

(6) フラッシュ・レディオグラフィ

表記のフラッシュ・レディオグラフィは物性のリソグラフィー、IC用マスクの焼き付け用や工業製品の検査に活用することができ、そのエネルギーは図-5に見るように2 J~1.5 MJの領域である。

(7) 重イオンの電子ビーム加速

これはパルス重イオンビーム用の電子ビーム加速であって、その原理は電子ビームを高速度で走らせ、そこに重イオンを打ちこみ、電子の電界で重イオンを加速する方式である。この電子ビームに必要なエネルギーは500 J~3.5 MJの領域である。特に重イオンビームは一定の深さの点にある標的又は試料にビームエネルギーを集中的に注入するので前述のガン治療用や後出の慣性核融合用等にその専用加速器の開発が早急に求められている。

(8) 核融合

この利用については4章で述べることにし、そのエネルギー領域を示せば、図-5に見るように、300 J ~

5 MJにある。

(9) 核反応模擬、並びに粒子ビーム兵器

この分野については先進各国が研究中であり、そのエネルギー領域はそれぞれ130 J~60MJ並びに35k~20GJ (GJ; 10⁹J)といわれる。

3.2 超高速パルスパワーとその応用分野

図-8は、図-5の座標を変えて、パルスパワーをパルス幅(秒)とパルス電圧波高値(V)でその応用分野を分類したものである。ここではエキシマレーザだけについて述べ、他の項目についてはすでに記述したし、未記述のものは第4章で触れることとする。

同図に見るように、n秒(n秒; 10⁻⁹秒)超高速パルスパワー技術として、軽イオン加速、重イオンの電子ビーム線形誘導加速、そしてエキシマレーザの放電励起がある。また、μ秒高速パルスパワー技術としては、レーザの電子ビーム励起、レーザの電子ビーム制御励起、そして重イオン(low β)の線形誘導加速が挙げられる。

(1) エキシマレーザの励起

レーザ光線は波長がそろい細いビームに絞れるので、核融合に必要な高温高密度プラズマの発生用として、すなわち慣性核融合用ドライバーの一つとして大出力化の開発が進められているのは周知の通りで、第4章で触れるところである。

大出力のパルス・レーザとしては、炭酸ガスレーザが波長10.6 μm (μm; 10⁻⁶m)、ガラスレーザが1.06 μmといずれも赤外線であるのに対し、エネルギーの吸収効率がよい紫外線領域の最有力候補が波長172~430 nm (nm; 10⁻⁹m)のエキシマレーザである。

このレーザの開発は核融合への利用が究極の目標であるが、それ以前に、ウランの同位体分離、1 μm以

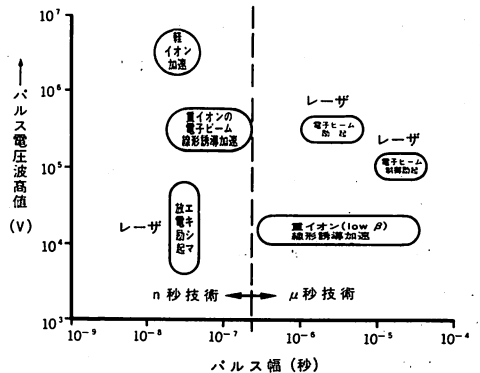


図-8 高速パルスパワーと応用分野

下の細かい加工が必要な超LSI製造、特定の波長の光だけに反応するような太陽電池製造などに役立つので、工業的にもその開発は重要な意味を持っている。このエキシマレーザの原理は、電子ビームの照射や放電で原子を励起して、不安定な分子状態を作り、これが分解する時に紫外線レーザを放出する原理を利用している。

発光原理は、コンデンサーに蓄えた電気を100 ns程度の短時間内にレーザ装置の電極へ導き、放電させる。しかし、高気圧ガスをいきなり放電すると雷放電と似た状態となり、レーザ媒体中で均一な放電ができず、エキシマが効率よく生成出来ないのので、まず網状の電極の内側で予備放電し、電子の種の量を増やし、その後主放電という二段階で放電させる。この瞬間、エキシマになった分子が分解し、レーザパルスが発光するというパルスパワー技術である。

日本でも精力的に研究が行われており、キセノンと塩素を組み合わせたレーザで15 Jの世界最高出力を実現し、クリプトンとフッ素の組合せでは出力400 Jのものが米国マックスウエル社で実現され、ロスアラモス研究所では出力20 KJのものが現在建設中である。

4. 核融合

核融合反応の現象は周知のように太陽の中心部で大規模に起っており、これが太陽のエネルギー源であり、地球上のすべての生物活動の起源になっている。この太陽を地球上に小規模で実現させようという研究が核融合の目標である。

因みに核融合源の主たる燃料である重水素は、海水25 l中に約1 gほどが含まれている。重水素と三重水素の同量ずつの混合燃料1 g当りの融合による発生エネルギーは、約10万キロワット時である。

4.1 慣性核融合とパルスパワー

慣性核融合方式は物体に力を作用しても、すぐには動き出さないという慣性の原理を利用した方式である。即ち、この方式は「ドライバー」と言う慣性核融合を引き起すエネルギー源であるパルスパワーを燃料のペレットに四方八方から照射して、表面を蒸発させ、その反作用の力でペレットの中心部を圧縮し、高温にする「爆縮」という核融合反応で、ペレットが飛び散る以前の極めて短時間の内に反応を終了させてしまおうという方式である。

この方式は核融合の可能性を示す「ローソンの条件」で記述すると、重水素と三重水素からなる燃料ペレ

ットを、ドライバーを用いて元の密度の1万倍の 10^{25} 個/cm³の密度(n)までに圧縮し、イオン温度(Ti)を核融合反応の点火温度である10 keV(セ氏1億度)に加熱し、高温にする。この間の閉じこめ時間(τ)は1 ns、 $n\tau$ の値にして 10^{16} 秒/cm³となる。慣性核融合はこれ等の値の組合せで核融合の実現を図る方式であるから、これ等の値に達すると核融合反応は急速に進行するので、磁場による閉じこめを必要としない方式である。

この方式はトカマックに代表される磁場閉じこめ核融合方式が目標としているイオン温度10 keV、密度 10^{14} /cm³、閉じこめ時間10秒の値に対比される。

従って、この慣性核融合方式では極く短時間、局所的なエネルギー注入(「ストップピング・パワー」)しうるドライバーによるパルスパワーと、標的である燃料ペレットとの組合せが本質的な役割を果たすことになる。

(1) ドライバーとしての条件と現状

慣性閉じこめ核融合の科学的可能性を実証する目的で、現在考えられ開発された各種ドライバーと、それらのパルスパワーシステムとしてのエネルギー変換の流れ等を図-9に示す。

ドライバーを用いた慣性核融合実用化の為の条件はいろいろとあるが、それらの条件の内のドライバーに関係する次の4点に絞って、現在開発された代表的なドライバー(図-9)を参照し検討する。

- (イ) n秒でのドライバの変換効率 $\geq 5 \sim 10\%$
- (ロ) 繰り返し動作 $1 \sim 10\text{Hz}$
- (ハ) ペレット圧縮有効波長 $\leq 1 \mu\text{m}$
(*アブレーションの波長依存性)

- (ニ) 高出力化の実績 $\sim 1\text{MJ}$

ドライバーとしてのネオジウム・ガラスレーザは(イ)、(ロ)の条件を、炭酸ガスレーザは(イ)、(ハ)の条件を、KrFエキシマレーザは(イ)、(ニ)の条件をそれぞれ満たしていない。このようにレーザをドライバーとして用いる場合、波長や効率など総てに亘って実用化の為の有利なレーザは現存していないと言える。従って、図-9に示した現在開発されたレーザは純粋に爆縮物理を研究するためのものであり、直接、炉に結びつくものではない。それ故に、これらの点を克服するために新しい型のレーザの開発を進めると同時に、レーザの代り

脚注 *ペレット表面が加熱されて粒子が飛び出すことを言う。

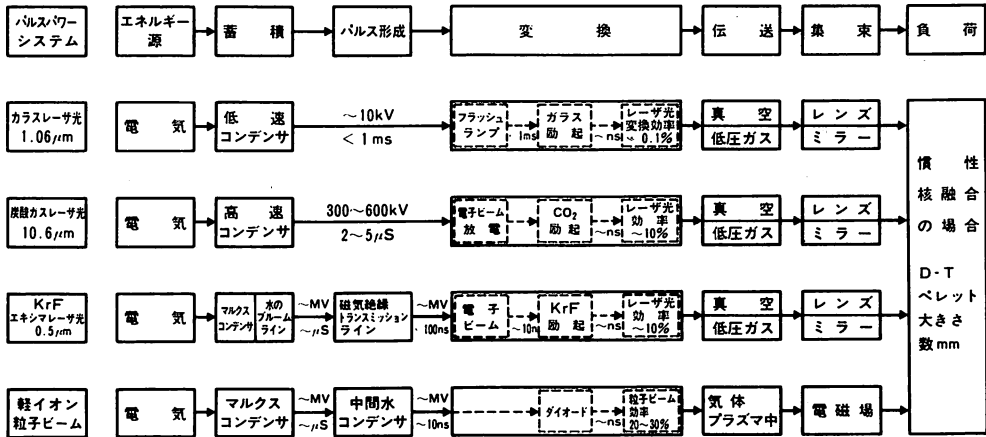


図-9 現状の各種ドライバーとエネルギー変換の流れ

表2 種々の核融合方式の比較

方式が異なるものを厳密に比較するのは困難であるが比較の目安を表に示す。

核融合の閉じこめ方式		慣性		ピンチ	磁場
		レーザー	軽イオン	フォーカス	トカマク
開発状況	τ sec	≪ 10 ⁻⁹	-	< 10 ⁻⁷	≲ 0.1
	n τ sec cm ⁻³	10 ¹³ *(10 ¹⁵)**	-	≲ 10 ¹²	~ 3 × 10 ¹³
	T keV	20 *(0.5)**	-	≲ 10	≲ 8
	Q 又は ターゲット利得	10 ⁻³ *(10 ⁻⁷)**	-	< 10 ⁻³ (DT換算)	~ 10 ⁻² (DT換算)
	DT 利得	10 ⁻¹ *(10 ⁻⁵)**	-		
状況	ドライバーエネルギー E ₀	20kJ (SHIVA)	1MJ (PBFA-1)	≲ 1MJ (Frascati)	≲ 0.4 MJ (PLT)
		レーザー出力	ビーム出力	電源容量	NBI 出力
科学的臨界条件 (Q=1) における所要ドライバーエネルギー		≳ 100kJ	≳ 100kJ	≳ 6 MJ	
Q 値の比例則		$\begin{cases} Q \sim E_0^2 & \text{for } Q \ll 1 \\ Q \sim E_0^4 & \text{for } Q \gg 1 \end{cases}$		Q ~ E ₀	
実用炉	Q	≲ 1000	50 ~ 100	?	1 ≪ Q ≲ ∞
	ドライバーエネルギー	1 ~ 5 MJ	1 ~ 5 MJ	?	
	ドライバーコスト (電源コスト)	固体レーザー 10 ³ ドル/J ガスレーザー 10 ² ドル/J	10 ドル/J	≳ 1 ドル/J (電源)	
炉構造		比較的単純	比較的単純	単純	極めて複雑
研究・開発課題		新レーザーの開発	ビームの伝播・収束	Q値の比例則	炉材料
		爆縮効率・安定性	繰返し率		保守方式
			爆縮の安定性		
中性子源				100kV, 1MJ 電源	
				1 Hz	
				3.6 × 10 ¹⁸ n/sec	3 × 10 ¹⁶ n/sec
				(10 MW)	(85 kW)
				Q ~ 10	Q ~ 0.17
		文献 1)		文献 2)	

* exploding compression mode

** ablative compression mode

文献 1) R. M. Brugger, Nucl. Tech. 15('72)14

2) O. Zucker et al. Nucl. Instrum & Methods. 145('77) 185

に、イオンビーム等を用いる方向にドライバーの開発が進められている。

軽イオンビームの研究はレーザー核融合の実用化が難しいとあって、急激に脚光を浴び、各国で研究されるようになった。その理由は電子ビーム発生装置の極性を変えるだけで、原理的には軽イオンビーム発生装置に改良できるからである。たとえば、サンデア研究所（米国）はProto-I（最大ビーム電力 1 TW）、Proto-II（10TW）、PBFA-I（30TW）の加速器で軽イオンビームによる研究を積み重ね、1986年完成のPBFA-II（100TW）の加速器を計画している。

重イオンビームは本質的に担体の質量が大きいため同じエネルギーに対して速度が小さくて済み、極く短時間の局所的なエネルギー注入を容易にする。従って、他の現在開発されているどのドライバーよりも、ストップピングパワーに関しては最も有利であることがわかる。更に、標的である燃料ペレットとの相互作用はほとんど古典物理的取り扱いですむので、効率の良いことが予測されている。そこで、米国をはじめ、西独等で具体的な検討が行われているが、重イオン加速器は軽イオン加速器とは違って、莫大な建設費用を必要とするので、具体的な建設となると慎重にならざるを得ないのが現状である。

4.2 開発状況と実用炉への課題

慣性核融合のレーザーと軽イオンドライバー方式に関して、その開発状況と、実用炉への開発課題等を種々の核融合方式と比較して表2にまとめて示す。方式の異なるものを厳密に比較するのは困難であるが、比較の目安として参考にいただければ幸いである。

世界的な流れとしては、ブレイク・イーブン致達に必要なパルスパワーのドライバーの開発は、ストップピングパワーの小さい電子ビームでは不相当とされている現在、レーザーよりも、イオンビームがやや有望視されているのが現状であろう。

尚、核融合に関しては、本誌のシリーズに「核融合研究の現状と展望」として2部に亘り詳しく解説がなされているので参照されたい³⁾。

文 献

- 1) "The Global 2000 Report to the President", U.S. Government, 1980 (邦訳 "西暦2000年の地球", 家の光協会, 昭和55年)
- 2) 梅津照裕; エネルギー・資源 Vol. 4, No 4 (1983) 287
- 3) 宇尾光治; エネルギー・資源 Vol. 4, No 4 と No 5 (1983) 306 と 399

海外行事案内

- 第11回エネルギー技術会議と見本市 (ET '84)
(11th Energy Technology Conference & Exposition)
1984年3月19日(月) - 21日(水)
米国 ワシントン
- 化石を主体とした合成燃料に関するシンポジウム
(Fossil Based Synfuels : Symposium)
1984年4月16日(月) - 20日(金)
米国 ジョージア州 アトランタ
- 中国トータル エネルギー 84 : 第1回トータルエネルギー会議と見本市
(China Total Energy 84 : 1st Total Energy Conference & Exposition)
1984年6月12日(火) - 18日(月)
中華人民共和国 広東

- 第5回水素エネルギーに関する世界会議
(Hydrogen Energy : 5th World Conference)
1984年7月15日(日) - 19日(木)
カナダ オンタリオ州 トロント
 - エネルギー変換技術に関する第19回連合研究発表会
(19th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference)
1984年8月19日(日) - 24日(金)
米国 カリフォルニア州 サンフランシスコ
- (以上の行事については、現在主催者へ照会中です。詳細判明しだい、改めてご案内する予定です。)