

平成17年度冬学期総合科目
「エネルギー問題・地球環境問題を考える」

平成17年12月16日
11号館1101教室

「核融合エネルギー開発研究の最前線」
(核融合, プラズマ, トカマク, ITER計画, 技術安全保障)

東京大学高温プラズマ研究センター
小川 雄一

核融合とは

- 核融合
軽い元素(水素,)
ビッグバン後の元素生成
- 核分裂
重い元素(ウラン,)
- 化学反応

核分裂(200MeV), 核融合(17.6MeV)
化学反応(~10eV)

2005年はEinstein100年記念

質量の減少とエネルギー
核融合反応の過程では、反応物の質量は軽くなる。この質量の減少がエネルギーとして発生する。下の式は「特殊相対性理論」に出てくる関係式で、Eがエネルギー、mが質量、cは光速(3x10^8)を表わす。この式は質量がエネルギーに変換できることを示している。トカマク装置で発生しているエネルギーに換算すれば、約2500万キロワット時のエネルギーを発生する。これは原子力発電用1基がおよそ1日に生じるエネルギーに相当する。

アルバート・アインシュタイン
(1879 ~ 1955)
ドイツ生まれのアメリカ人の物理学者。1905年に発表した「特殊相対性理論」の中で、質量がエネルギーに変わり得ることを理論的に示した。

核融合反応
E = mc^2

太陽内部での核融合反応
太陽原子核の衝突によって、ヘリウム原子核が生成される(実際の反応はもう少し複雑な過程がある)。このとき、反応前後で減少した質量が熱エネルギーへと転化する。

(雑誌: Newtonより)

核融合炉の条件とは

- ・プラズマ温度
- ・プラズマ密度
- ・閉じ込め時間

(磁場閉じ込め方式)

閉じ込め時間 × 中心イオン密度

中心イオン温度 (度)

エネルギー増倍率Q=1
エネルギー増倍率Q=30

トカマク 1990年代
ITER(学測) 核融合炉(学測)

JT-60(日) Q=1.25 世界記録
JT-60(日) 5.2億度 世界記録

トカマク 2000年代
ヘリカル 1980年代
トカマク 1970年代

トカマク型装置
ヘリカル型装置
球状トラス装置
ミラー型装置
逆磁場ピンチ型

4. 世界最高、プラズマ温度5.2億度を達成(JT-60)

核融合性能
中心密度 × エネルギー閉じ込め時間

イオン温度
電子温度

地球上で人類が手にした最高温度(45keV=5.2億度)としてギネスブックに登録された。

GUINNESS BOOK OF RECORDS
Presented to the Japan Atomic Energy Research Institute, Naka Fusion Research Establishment who achieved a new world record temperature of 4.2 x 10^8 Kelvin (45keV) on 19 July 1997 with their STS93 Tokamak deuterium experimental device.

研究はどこまで来たか

どこまで来たか

トカマク方式により、燃料への加熱入力と反応出力が釣り合う条件（ゼロ出力プラズマ条件）を実現；JET（欧）とJT-60（日）。
 実用プラントに必要な自己点火条件（燃料への加熱入力を十分上回る出力が得られる条件）の達成をITERで目指す。

トカマク型装置

真空容器
トロイダルコイル
磁気線
プラズマ電流
ホロイダル
プラズマコイル

- トランスの原理を使いドーナツ状容器の中にある燃料に電流を流し簡単に太陽の中心温度を実現
- 対称で構造が単純
- 最も進歩した、最も有望な核融合の方式

閉じ込め時間 × 中心密度 (秒 × 立方cm)

中心イオン温度 (度)

100万 1000万 1億 10億

2

核融合エネルギーの「夢と現実」

- 燃料が無尽蔵 → 重水素に関しては
 - 核融合炉として必要な元素の資源量は
 - 他のエネルギーの資源量は？
- 放射能としてクリーン → 核分裂炉に比べれば
 - トリチウムの安全性は
 - 放射性廃棄物は
- 30年後には実用化 → 十分な投資があれば
 - 技術的に実現可能なのか
 - 何が問題で、その見通しは

核融合エネルギーの「夢と現実」(2)

- 燃料が無尽蔵(重水素に関しては)
- 放射能としてクリーン(核分裂炉に比べれば)
- 30年で実用化(十分な投資があれば)
- 燃料の偏在が少ない
- 二酸化炭素排出が少ない
- 核的暴走はない
- 核拡散の心配が少ない
- 開発途上国への技術導入の障壁が少ない

→ **核融合の価値が落ちた訳ではなく、現実を見据えた対応が必要**

核融合エネルギーの資源量は无尽蔵か？

- 重水素 : 0.01%存在
- 三重水素(トリチウム) : $T_{1/2}=12.3$ 年の放射性物質

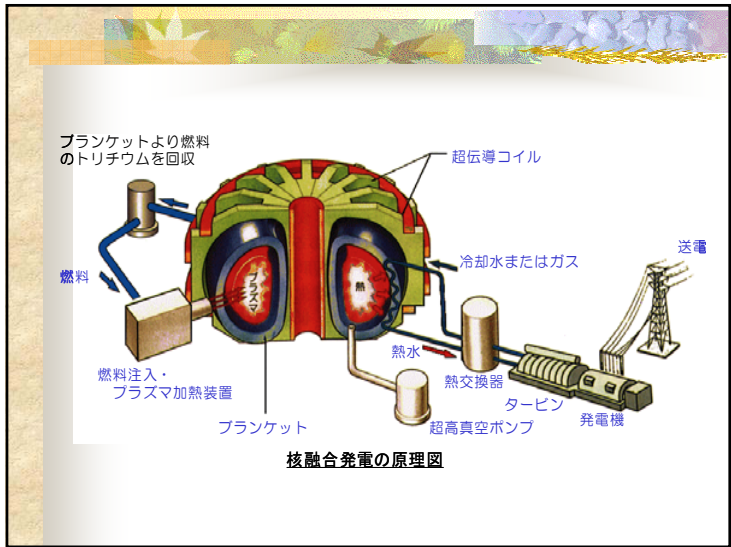
【リチウムからトリチウムを生産】

$$n + 6\text{Li} \rightarrow \alpha + \text{T}$$

$$n + 7\text{Li} \rightarrow \alpha + \text{T} + n$$

【核融合プラントに使われる希少元素は？】

- 超伝導コイル用のニオブ
- ブランケット用などのベリリウムやバナジウム



核融合はクリーンか？ 安全か？

- 原子炉の安全性は、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」が原則
- 核融合では、主に【閉じ込める】に注意を集中
 - 核的暴走を原理的に起こさない

○永遠のエネルギーを目指して 21世紀の地球環境に調和するエネルギーの開発

- 優れた環境性** 地球の温暖化の原因となる二酸化炭素などの発生が少ない。廃棄物の放射能の量は比較的短い期間ですみやかに減少する。
- 高い安全性** 核的暴走がない。崩壊熱密度が小さい。
- 豊富な資源** 重水素は、海水中に豊富に存在。三重水素は、埋蔵量の多いリチウムより生成可能。

発電システムの二酸化炭素排出率

発電システム	二酸化炭素排出率 (tCO ₂ -e/kWh)
石炭火力	270
石油火力	200
NG火力	170
太陽光 (家庭用)	85
太陽光 (産業用)	61
風力	33.7
水力	34.3
地熱	10
軽水炉	4.8
重水炉	5.7

核融合炉の利点

- 燃料資源は無尽蔵に近い
- 大規模電力供給が可能
- 二酸化炭素排出は数十分の1
- 長寿命の超ウラン元素が無い

放射線の影響を受ける度合: 核融合炉 (低い) < 軽水炉 (高い)

核融合エネルギーは、資源、環境影響、安全性、供給安定性において優れた特性を持ち、基幹エネルギーとしてバランスの取れたシステム

- 資源量が十分 (燃料、炉を構成する材料)
- 環境影響が小さい (温暖化、廃棄物)
- 安全性が高い (可動性放射線リスク指数が低い)
- コスト (競合可能性、バックストップ)
- 安定供給 (アベラビリティ、負荷調整)

現行石炭火力(GO2回収なし)の値を基準(=1.0)とした。ただし、安心・安全と廃棄物放射線リスクの項目は軽水炉が基準。経済性のみリアスケールなのに注意

