☆

IAEA 国際協力トカマク炉 INTOR の現状

(日本原子力研究所) 藤 沢 登

INTOR (International TOkamak Reactor) のワークショップは IAEA 主催のもとに、約 8 年間にわたり活発な活動が続けられ、現在 Phase Two A, Part 3 を開始したところである。本稿では、INTOR ワークショップの経緯、INTOR 装置の概要、1985 年終了した Phase Two A, Part 2 の成果、現在進行中の Part 3 の予定について述べる。

☆

I. INTOR ワークショップの経緯

現在稼働している大型トカマク装置 (JT-60 等) の次世代の装置 (次期装置) を国際協力で建設、運転することを目的として、1978 年 IAEA は INTOR ワークショップを設立した。ワークショップは段階的に進められており、Phase Zero から現在の Phase までの進展を第 1 図に示す。

	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
Phase - Zero	—									
Phase One			—	—						
Phase Two A										
Part 1				—	—	—				
Part 2						—	—	—		
Part 3									—	—

第 1 図 INTOR ワークショップの進展

INTOR についてはこれまで幾つかの解説があり⁽¹⁾、また各 Phase ごとに報告書が出版されている^{(2)~(5)}。ここでは、ワークショップのこれまでの歴史を簡単に述べる。

Phase Zero は、第 1 図に見るように、1978~79 年末の約 1 年間行われた。ここでの主要検討課題は INTOR の目的とその位置付け、次期装置設計のためのプラズマ物理と技術のデータベースの評価、そして主要な問題点と必要な R&D の抽出であった。作業結果⁽⁶⁾は前向きのものであり、ワークショップは次段階へ進むこととなった。

Phase One は 1980~81 年の 1 年半で、ここでは Phase Zero のデータベースを基として概念設計をまとめた。また同時に、INTOR での試験計画や INTOR の次のデモ炉との関係を検討した。設計の内容は 620 MWt の核融合出力を持ち、燃焼時間が 100~200 s のトカマク炉である⁽³⁾。

1981~83 年にかけて、Phase Two A, Part 1 のワークショップが行われた。ここでは主に Phase One の設計で明らかとなった重要課題の検討を中心として、コスト・利益・リスクの解析、トリチウム・ブランケットの設計などが行われた⁽⁴⁾。この作業の結果、プラズマ加熱方式として高周波 (RF) 加熱の採用等 INTOR 概念の改善がなされた。

Phase Two A, Part 2 (1983~85) では、Part 1 での結果を基にして新たな重要課題を選択し、その検討を深めると同時に、データベースの見直し結果をベースにして INTOR 概念の見直しを行なった。この結果については後述する⁽⁵⁾。

昨年 (1985 年) から Phase Two A, Part 3 を開始し、ここでは Part 1 と 2 で抽出された重要課題の検討とデータベースの見直しを継続すると同時に、イノベティブなアイディアを検討し、INTOR 概念に取り入れる方向で現在作業が進んでいるところである。

II. INTOR 装置の概要

INTOR に課せられた目的は以下の通りである。

- (1) INTOR は現在の大型トカマク装置 (JT-60 等) から見て、合理的に実現できる範囲内で最大のステップ幅をもつ。
- (2) トカマク型デモ炉のプラズマ特性を実証する。
- (3) デモ炉に必要な諸技術を炉システムとして開発し、試験する。
- (4) トリチウム生産用ブランケット、材料およびプラズマ工学技術の開発用施設として活用する。
- (5) 核融合炉機器の信頼性試験。
- (6) 核融合炉の保守技術の試験。
- (7) 核融合炉の安全性、環境適合性等の試験。

Present Status of INTOR (International Tokamak Reactor) under IAEA: Noboru FUJISAWA.

(1986 年 6 月 30 日 受理)

以上のような目的を満足する装置としてまとめられた INTOR の現在の概念を、第 1 表と第 2 図に示す。

また INTOR の運転計画を第 2 表に示す。

第 2 図 INTOR の立面図

第 1 表 INTOR の主要パラメータ

		Phase Two A, part 2 suggested parameters
Major radius R	(m)	5.0
Plasma radius a	(m)	1.2
Elongation k		1.6
Burn time	(s)	100/200
Duty cycle	(%)	70/80
Average beta $\langle\beta\rangle$	(%)	4.9
Plasma current I	(MA)	8.0
D-T density $\langle n_t \rangle$	(m^{-3})	1.4×10^{20}
Ion temp. $\langle T_i \rangle$	(keV)	10
Toroidal field B_t	(T)	5.5
Plasma heating	(MW)	40(ICRF)
D-T thermal power P_{th}	(MW)	585
Fluence goal	($MW \cdot a \cdot m^{-2}$)	3
Neutron wall load P_n	($MW \cdot m^{-2}$)	1.3

Ⅲ. Phase Two A, Part 2 の成果

本章では Phase Two A, Part 2 のワークショップの結果について述べる⁽⁶⁾。この Phase で取り上げた重要課題は、①不純物制御と第 1 壁、②RF 加熱と電流駆

第 2 表 INTOR 運転スケジュール

Stage	Years	Emphasis	Avail- ability (%)	Annual 14 MeV neutron fluence† ($MW \cdot a \cdot m^{-2}$)
IA	1	Hydrogen plasma operation Engineering check-out	10	
IB	2	D-T plasma operation	15	0.156
II	10	Engineering testing††	25	0.26

† Based on 80% duty cycle, $1.3 MW \cdot m^{-2}$ average neutron wall loading and indicated availability.

†† The requirement on Stage II is to accumulate $\sim 3 MW \cdot a \cdot m^{-2}$. This could be achieved in several ways; the case given here is only a representative one.

動、③過渡電磁気解析、④保守、⑤国際協力建設がもたらす技術的利益の評価、⑥データベースの評価(プラズマ物理、工学、ニュークリア)と、これらの成果を基にした INTOR 概念の見直しである。

1. 不純物制御と第 1 壁

INTORの不純物制御システムは α 加熱出力120MWの熱と $2 \times 10^{20}/s$ の割合で生じる α 粒子とをプラズマ

や周囲の第1壁に大きな影響を与えることなく処理するものである。代表的な不純物制御システムとしてダイバータとポンプリミタがあり、ポロイダル・ダイバータが主案として選択されている。選択上の主要な理由は、ダイバータにより低温(~ 20 eV)、高密度($> 10^{20} \text{m}^{-3}$)のプラズマがダイバータの受熱板近傍に形成される可能性が大きく、これにより受熱板の損耗の軽減、ポンプ容量の減少、プラズマへの不純物流入の低減が可能と予測されたことである。このようなプラズマサイドの検討を受けて受熱板の設計が行われた。受熱板の基本構造は水冷した銅あるいは銅合金の基盤にタングステンアーマを接合した二重構造である。また板の熱負荷を 3 MW/m^2 以下に抑えることとした。第1壁として水冷の316ステンレス鋼を選択した。

2. RF加熱と電流駆動

Phase Oneの検討・評価により、加熱手段としてイオンサイクロトロン周波数帯(IC)のRF波が主案として採用されたが、このPhaseの検討の結果でも重水素の第2高調波(85 MHz, 50 MW)を主案とすることが再確認された。

現在稼働中の多くのトカマク装置でIC加熱の実験が進められており、また高加熱入力実験も近い将来に予定されている。実験で得られた加熱効率是他の有力な加熱手段であるNB(中性粒子)加熱と同程度である。加熱中の不純物流入の問題はいくつかの解決例が示されたが、今後継続して対策を考える必要がある問題である。また、IC加熱時のエネルギー閉じ込め時間の減少はNB加熱と同様でありトカマクにとっての重要な課題である。IC加熱のモデル計算も進展し、INTORを対象とした詳細な計算が行われ、必要な加熱パワー、IC波のアンテナ設計等のデータベースを補足した。また、アンテナとしてループアンテナの設計が行われた。

RF波を用いてプラズマ電流を非誘導方式で駆動することにより得られるメリットには大きなものがある。高密度($\sim 10^{20} \text{m}^{-3}$)での非誘導電流駆動の実験データベースは極めて少なく設計に反映することは無理である。しかしながら、低密度(10^{18}m^{-3} 台)でのLH(ローワーハイブリッド)波による非誘導電流駆動のデータベースはかなり蓄積されてきた。ワークショップにおいても、プラズマ電流の立上げに従来の誘導方式に代り、この方式が利用できるかどうかがこのPhaseの大きな検討課題であった。実験結果と理論的解析とを比較し、いまだ完全に説明できない点があることから、LH波による非誘導電流駆動方式の採用を見送ることとした。

3. 過渡電磁力の解析

プラズマ位置の安定化、プラズマの起動、ディスラプション時の電磁力などの解析には過渡電磁力解析が必須である。この解析にはトラス構造体だけでなくプラズマのモデル化も必要であり、複雑な解析コードの開発が必要である。また、当然のことながら、結果は設計に強く依存する。ここではプラズマ位置の安定化について述べる。

INTORで採用したD形断面を持つプラズマは上下方向の外乱に対して位置不安定である。これを安定化するためにはプラズマを取り囲む導体構造によるパッシブな安定化効果を利用し、プラズマの動きを数ms以上の時定数とし、さらにアクティブなコイルにより安定化をはかる必要がある。ワークショップでは、パッシブな構造体とアクティブなコイルとその電源の評価が検討された。アクティブなコイルの位置として第1壁の後、遮蔽体の後、トロイダルコイルの外側の3つの案が検討された。いずれの案もプラズマ位置の制御は可能であるが、その電源はもちろん順番に大きくなる。パッシブ構造体については、必ずしも特別導電性の良いパッシブコイルを用意する必要がないことがわかった。また、この結論はアクティブな制御系の時定数にも当然依存するものである。

4. 保守

ここでの主なタスクは、完全遠隔操作(All Remote; AR)炉と、部分的ではあるが人間が接近可能(Personnel Access; PA)な炉との比較検討と、遠隔操作技術のデータベースの評価であった。以下に前者の比較検討について述べる。

AR炉とPA炉との比較検討結果は次のような結論に至った。

- (1) AR炉では炉本体遮蔽体厚を約50cm削減できる一方、炉建屋の壁厚が約1m余分に必要となる。しかも炉壁内面の放射能化レベルが4オーダー上昇する。
- (2) 主要コンポーネントの分解修理時間についてはAR炉、PA炉ともに大きな差はない。
- (3) 必要遠隔操作機器はAR炉、PA炉に対してはほとんど変わらない。
- (4) 炉のアベイラビリティにはほとんど変化がない。
- (5) 分解修理のフレキシビリティはPA炉が優れている。
- (6) コストの点から見た場合、AR炉は遮蔽体厚の減少、トロイダル/ポロイダル・コイル寸法の

縮小,それに伴う電源容量の削減にもかかわらず,炉建屋壁厚の増大により PA 炉との差が小さい。

以上の結果から,現在の INTOR のレファレンス案である PA 炉概念を継続し,可能な限り遠隔操作技術を取り入れることとした。

5. 国際協同建設がもたらす技術的利益の評価

INTOR の設計,建設を国際協力で行なった場合の技術的利益得失を評価することが目的である。評価の対象として以下の3ケースを選択した。

シナリオ A: 比較のベースとするもので各国がおのの INTOR を各国内に1台建設する。

シナリオ B: 既存技術で製作できるコンポーネントは各国に分割して担当させ製作する。先進技術が必要なコンポーネントはすべての参加国が1/4ずつ分担して製作する。例えば,12個のトロイダルコイルを各国が3個ずつ製作する。

シナリオ C: すべてのコンポーネントを各国に分割して製作させる。例えば,トロイダルコイル(USA),ポロイダルコイル(日本),ブランケット(EC),加熱装置(USSR)といった分割である。

以上の3ケースについて,コスト,スケジュール,技術的利益の3点について比較した。前2者の比較結果を第3表に示す。シナリオ C が B に比べて効率的であり,参加国当りのコストも最小となり,またスケジュールの遅れも小さい。

第3表 INTOR の設計建設に必要なコストとスケジュールの比較

Scenario	Four national INTORs	One international INTOR	
	A	B splitting	C branching
Relative cost of one device	1	1.67	1.24
Relative cost per participant	1	0.42	0.32
Construction schedule delay (a)	0	~2.3	~1.2

技術的利益得失は各参加国が得る技術的情報量として定義し,定量的評価を試みた。先進技術に関して得られる情報はシナリオ B が C に比べてはるかに大きい。これはスケジュールの遅れが大きいことの不利を補って余りあると考えられる。シナリオ B は複雑であるが,強力なデザインチームができ,各国が充分先進

技術の開発を行えば可能であるとの結論に達した。

6. データベースの再評価と設計の見直し

INTOR プラズマが自己点火を持続するには,エネルギー閉じ込め時間として 1.4 s 必要である。閉じ込めに関する研究は着実に進展しているが,残念ながら,追加熱時のエネルギー閉じ込めの結果は楽観的なものではない。実験で得られた閉じ込め性能は大きく2つに分けることができ,比較的良好なもの(Hモード)と良好でないもの(Lモード)とがある。上記のエネルギー閉じ込め時間を達成するためにはHモードの実現が必須であり,これはダイバータ付きの装置で観測されている。INTOR ではダイバータを採用しており,Hモードのプラズマは大いに期待できる。

プラズマ圧力と閉じ込め磁場圧力との比を β 値と称し,閉じ込め効率の指標を示す。 β 値の上限はプラズマ設計に重要な値である。近年,この課題に対する理論と実験との研究が進展し,次のような関係式(ローヤン則)で与えられることがわかってきた。

$$\beta_e[\%] = G I_p[\text{MA}] / a[\text{m}] B_T[\text{T}]$$

I_p, a, B_T はそれぞれプラズマ電流,プラズマ半径,トロイダル磁場であり,係数値として $G=3 \sim 4$ が得られている。INTOR の設計では $G=4$ を採用し,4.9%の β 値を得ている。

上述のデータベースの見直しと重要課題の検討結果を考慮して設計の見直しを行なった結果が,前章で述べた INTOR のパラメータ(第1表)と第2図に示した概念図である。

IV. Phase Two A, Part 3 の予定

昨年(1985)の秋からワークショップは Phase Two A, Part 3 の新しい段階へ進んだ。Part 3 では,Part 2 でのテーマであった重要課題の検討とデータベースの再評価を継続すると同時に,新たに主要テーマとしてイノベティブなアイディアを検討し,トカマク概念のイノベーションをはかることとした。そこでまず,イノベティブなアイディアを広く募り,各分野の専門家が提案されたものを検討するための専門家会議を開いた。この会議の成果を基に,現在ワークショップではイノベティブな案を取り入れた INTOR 炉概念に向けて作業を進めている。

1. トカマク概念のイノベーションに関する

専門家会議

上記のような経緯のもとに今年1月にイノベーションに関する専門家会議が開催された。この会議では INTOR 炉に限らず,トカマク炉のイノベーションに

ついて広くアイディアを集めて検討した。提案されたアイディアは120案に達した。これらの案には簡単な改良案からかなりの斬新なものまで含んでおり、そのスペクトルは相当に広いものであった。また多くの提案は今までにどこかで提案されたものであり、この会議ではトカマク炉に対する適応性の再検討と考えてよい。

提案されたアイディアは9カテゴリーに分けられ、それらに対応した9グループで議論された。各グループでの評価方式として次のような考え方にに基づき評価を行なった。第1は、そのアイディアによりトカマク炉がどの程度改良されるかについて3段階の評価を行なった。第2は、そのアイディアを炉に適用できる時期、いい換えれば必要とする開発期間について3段階の評価を設けた。第3は、これらのアイディアを検討する上での優先順位の評価を行なった。

当会議の概要⁽⁶⁾と会議報告書⁽⁷⁾はすでに出版されており、詳しい内容については概要あるいは報告書を参照して頂きたい。

2. Part 3 の今後の予定

上記の専門家会議の報告を受けて、今年3月にワークショップが開かれた。ここではINTOR炉の立場からイノベーション案を見直し、どのイノベーションを設計に取り入れていくかを判断するための作業方針を決めた。

専門家会議で高い評価を受けたイノベーション案が当然のことながらワークショップで引き続き検討が進められることになった。ワークショップでの議論を効

率的にするため、基本となるいくつかのイノベーション案の組合せを作り、これらのスコーピングスタディを行うと同時に、各国独自のイノベティブなINTOR概念を現在検討中である。この作業は約1年ほど続き、来年(1987)夏には議論を収束し、報告書を作成する予定である。

INTOR ワークショップはプラズマ物理から核融合炉技術を含んだスペクトルの広いものである。本稿をまとめるに当たり、ワークショップへの参加者である森茂、苔米地 顕、飯田浩正、杉原正芳、常松俊秀、岡崎隆司、本多 力、笠井雅夫の皆様の協力に深く感謝します。

— 参 考 文 献 —

- (1) 苔米地 顕, 藤沢 登, 飯田浩正, 小林武司, 沢田芳夫, 宮本健郎: 核融合研究, 52, 5 & 99 (1984).
- (2) INTOR GROUP, International Tokamak Reactor: Zero Phase (Rep. Int. Tokamak Reactor Workshop Vienna, 1979), IAEA (1980); Summary in *Nucl. Fusion*, 20, 349 (1980).
- (3) *idem*: Phase One (Rep. Int. Tokamak Reactor Workshop Vienna, 1980~81), IAEA, (1982); Summary in *Nucl. Fusion*, 22, 135 (1982).
- (4) *idem*: Phase Two A, Part 1 (Rep. Int. Tokamak Reactor Workshop Vienna, 1981~83), (1983); Summary in *Nucl. Fusion*, 23, 1513 (1983).
- (5) *idem*: Phase Two A, Part 2 (Rep. Int. Tokamak Reactor Workshop Vienna, 1983~85), IAEA, (1986); Summary in *Nucl. Fusion*, 25, 1791 (1985).
- (6) STACY, W.M.: *Nucl. Fusion*, 26, 375 (1986).
- (7) IAEA-TECDOC-373: Rep. Specialists' Mtg. on Tokamak Concept Innovation, (1986).

第18回「炉物理・夏期セミナー」テキスト

実費頒布中

B 5 判オフセット印刷, 161p. (1986).

会員特価 2,000円 (定価 2,500円), 〒300円

I. 固有安全炉とは何か? 社会はそれを必要とするか?

- ①モジュール型固有安全炉の我が国での成立性, ②固有安全軽水炉の概念とその可能性, ③固有安全炉の特質とHTGR, ④固有安全炉とは何か, Modular LMRの意味は

II. パソコンと炉物理

- ①パソコンの現状, ②炉物理計算への応用

III. 高転換軽水炉の諸問題

- ①目標と課題, ②格子計算モデルとパラメータサーベイ, ③共鳴領域計算モデルとその検証, ④制御棒反応度効果, ⑤感度解析からみた炉心特性, ⑥炉型戦略からみた課題

◎ご希望の方は本会事務局へ。

第2回「核融合炉・夏のセミナー」テキスト

核融合炉研究の最前線と今後

実費頒布中

B 5 判オフセット印刷, 94p. (1986).

会員特価 1,500円 (定価 2,000円), 〒250円

内 容 (A) 大型装置によるプラズマ閉じ込め研究の最前線

- ①JT-60による最近の成果と今後(予稿なし)
②激光XII号による最新の成果と今後

(B) 次期の核融合炉R&D装置の設計と提案

- ①FERの設計と核融合次期装置計画
②核融合炉工学試験装置, ③FERの設計と課題

(C) R&Dを支える基礎研究の今後

- ①材料損傷研究の最近の進展と今後, ②核融合炉開発と中性子源, ③核データ整備の現状とJENDL-3, ④原子・分子データの現状と炉心工学の課題

◎ご希望の方は本会事務局へ。