

## ITER低コストオプションと 第三段階核融合研究開発基本計画との整合性

平成10年11月13日  
日本原子力研究所

### 1. 第三段階核融合研究開発基本計画における実験炉

平成4年6月、原子力委員会策定の第三段階核融合研究開発基本計画（以下「第三段階計画」という）は、「自己点火条件の達成及び長時間燃焼の実現並びに原型炉の開発に必要な炉工学技術の基礎の形成を主要な目標として実施する。これを達成するための研究開発の中核を担う装置として、トカマク型の実験炉を開発する。これらの研究開発により、第四段階以降の研究開発に十分な見通しを得ること」を目標としている。

この目標を達成するために実施すべき具体的な研究開発の内容として；

#### 1) トカマク型の実験炉による自己点火条件の達成及び長時間燃焼の実現を旨とした研究開発

##### (i) 自己点火条件

自己点火条件（エネルギー増倍率が20程度）を達成することを目指し、高性能プラズマの閉じ込めの改善、全プラズマ加熱入力に占める高エネルギー・アルファ粒子による加熱入力の比率の向上等に関する研究開発を行う。

##### (ii) 長時間燃焼

定常炉心プラズマへの見通しを得るために必要と考えられる長パルス運転

（1000秒程度以上）を実現することを目指し、高効率電流駆動法、ダイバータ板への熱負荷軽減法、ヘリウム排出法、ディスラプション回避法等に関する研究開発を行う。

とされている。さらに；

##### (2) 炉工学技術

実験炉の開発に必要な主要構成機器の大型化・高性能化を図るとともに、原型炉の開発に必要な炉工学技術の基礎の形成を図るため、実験炉による試験等を含めた研究開発を進める。

とされている。

## 2. ITER低コストオプション

- ITER特別作業グループ（SWG）は、本年3月～6月の間、「ITERの計画目標を守りながら、技術目標と技術裕度を切り詰めて、低コストオプション（以下、「RCO」という）を設計するための技術ガイドライン」の策定作業をしてきた。この過程で、第127回及び第128回核融合会議において、この低コストオプション（RCO）の技術ガイドラインは審議・了承された。別表-1に、同技術ガイドライン及び対応する第三段階計画を纏める。
- 平成10年10月20、21日のITER4機合合で、ITER所長よりRCOの技術ガイドラインを満たす設計案として、下表の3案が報告されたところ、以下、これを踏まえながらRCOの技術ガイドラインと第三段階計画の整合性を確認する。

| RCO検討案<br>(A:アスペクト比) | 高A装置案<br>(HAM) | 中A装置案<br>(IAM) | 低A装置案<br>(LAM) |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| アスペクト比               | 3.5            | 3.3            | 2.8            |
| プラズマ大半径              | 6.3m           | 6.2m           | 6.45m          |
| プラズマ電流               | 12.7MA         | 14MA           | 17MA           |
| トロイダル磁場              | 6.6T           | 5.5T           | 4.2T           |
| 誘導方式パルス長*            | ~500秒          | ~400秒          | ~600秒          |
| 核融合出力                | 66万kW          | 52万kW          | 52万kW          |

\*) 誘導方式でのフラットトップ維持時間

- HAMは高磁場定常運転に重点をおいた装置。磁場が強いためコイルの構造設計に困難が生じており、他の2案ほどには検討が進んでいない。
- LAMは加熱パワーマージン（L-Hモードの遷移パワーが小さい）に重点を置いた装置。
- IAMは日本提案に基づく案で、定常運転の確保と自己点火の可能性の両立を追求した装置。装置寸法を変更することなくプラズマ性能を最適化するとともに、より安価な超電導導体を採用してコスト低減を目指している。

### (1) プラズマ性能

#### ○制御された点火

- RCOの技術ガイドラインは、「 $Q$ は10以上」とされている。さらに、「 $Q \sim \infty$ の可能性も排除しない」とされている。従って、具体的設計に当たっては、閉じ込め裕度を持って $Q=10$ を達成する必要がある。
- 図1に、RCO（IAM）の $Q=10$ の運転裕度を示す。RCO（IAM）では、最終設計報告書における $Q \sim \infty$ 時と同じ約20%の閉じ込め裕度を持って $Q=10$ が達成される設計となっている。他の検討案もほぼ同様な閉じ込め裕度である。

- ・また図1に、RCO (IAM) の $Q=20$ の運転裕度を示す。  
 $Q=20$ の場合には閉じ込めの劣化に対して約10%の閉じ込め裕度を持って $Q=20$ を達成可能と判断される。
- ・図2に、RCO (IAM) の $Q=\infty$ の運転裕度を示す。  
 $Q=\infty$ への到達は閉じ込めの劣化に対して閉じ込め裕度が無いが、プラズマの調整や今後の閉じ込め改良を期待すれば実現が不可能ではない ( $Q\sim\infty$ の可能性も排除しない)。
- ・従って、RCOの技術ガイドラインは、第三段階計画の求める「 $Q$ が20程度」を満足するものと見なせる。

## ○長期間燃焼及び定常運転

- ・第三段階計画では、「定常炉心プラズマの見通しを得るために必要と考えられる長パルス運転 (1000秒程度以上) の実現を目指す」となっているが、これは非誘導電流駆動方式を含めた仕様と理解されている。
- ・RCOの技術ガイドラインでは、誘導方式のパルス長は300～500秒であるものの、これ以上のパルス長については「非誘導電流駆動方式による定常運転を目指す」とされている。
- ・図3にRCO (IAM) の長パルス運転裕度を示す。  
 ハイブリッド運転により1000秒パルス ( $Q=5$ ) は、閉じ込めの劣化に対して約10%の閉じ込め裕度を持って達成可能と判断される。  
 また同図では、フル電流駆動による定常運転 ( $Q=5$ ) の閉じ込めおよびベータ値限界に裕度が少ないが、これはHモードの閉じ込めデータベースを使った評価である。定常運転では非誘導電流による電流分布制御が可能であり、負磁気シアモード等のより高い閉じ込めとベータ値での先進運転をすることにより運転裕度が出ると期待できる。
- ・以上の考察から、RCOの技術ガイドラインは、第三段階計画の求める長時間燃焼条件を満足するものと見なせる。

## (2) 工学性能

### ○核融合炉に不可欠な技術の実証

- ・超伝導コイル、真空容器、炉内機器、遠隔保守等のITERで必要としている機器の運転条件は、RCOのどの検討案においても、ほぼ最終設計報告書の範囲と同じ領域にあり、核融合炉に不可欠な技術の開発及び実証には変更は無い。

### ○炉工学機器の試験

- ・RCOの技術ガイドラインにおける技術目標低減のひとつは工学要素試験における中性子壁負荷および中性子フルエンスの低減である (最終設計報告書では壁負荷が $1\text{MW}/\text{m}^2$ 、中性子フルエンスが $1\text{MW a}/\text{m}^2$ であり、RCOではそれぞれ

0.5 MW/m<sup>2</sup>, 0.3 MW a/m<sup>2</sup>である)。現在の検討案のうち I A M では、0.7 MW/m<sup>2</sup> 程度の壁負荷が可能と試算されている。

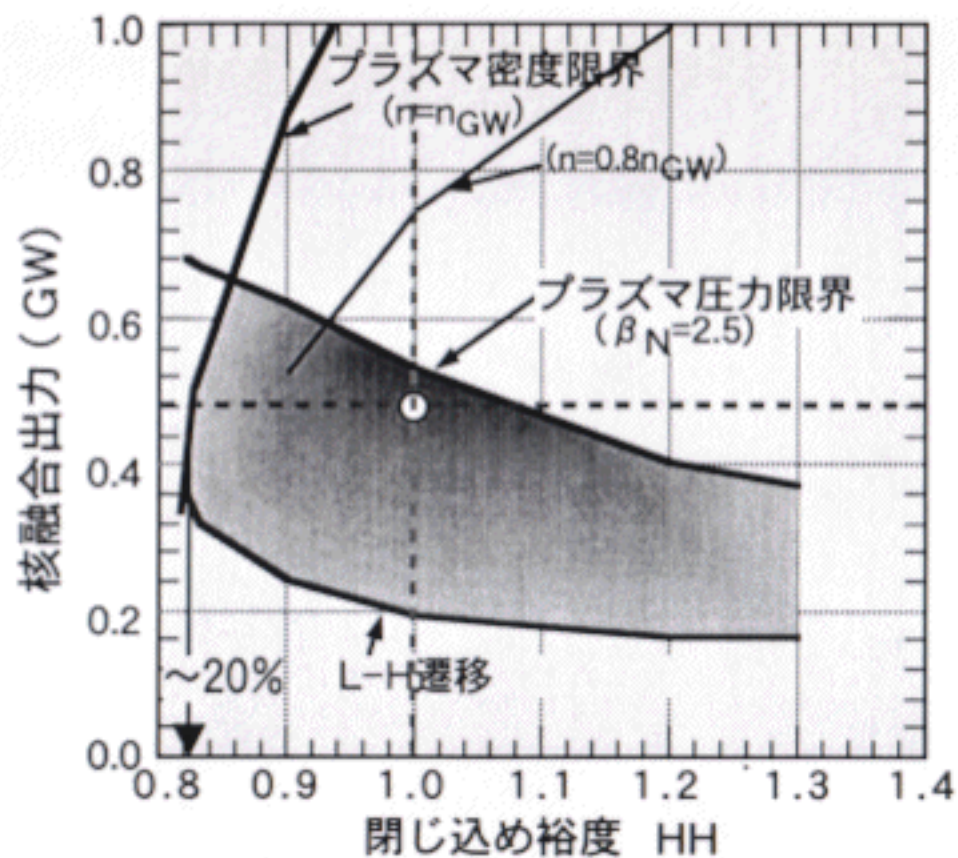
- ・本件については、第127回核融合会議で議論されたところ、第三段階計画としては数値目標が規定されていないが、上記ガイドラインの範囲でも I T E R の目標とするブランケットの性能試験は実施可能であること、一方、材料の重照射効果の観点では中性子壁負荷、中性子フルエンスは高いことが望ましいが、原型炉用構造材の開発計画としては別途中性子源が必須であること等から、今後の材料開発計画で整合をとれば容認し得るとの判断がなされた。

### 3. まとめ

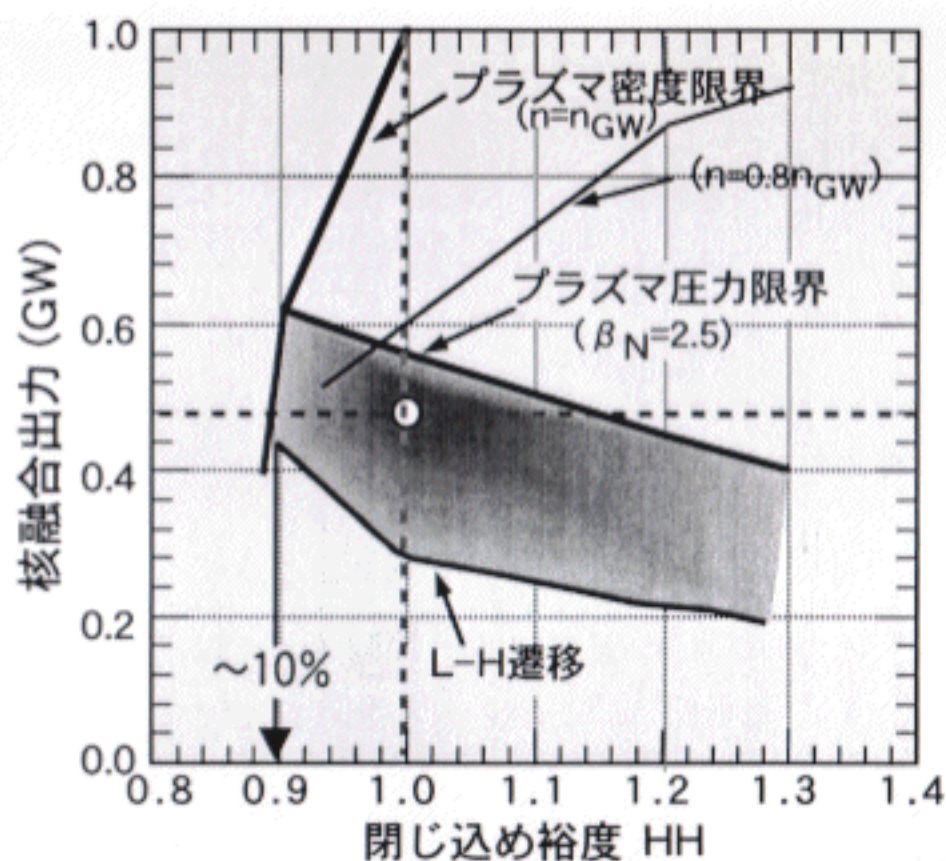
- ・以上のとおり、R C O の技術ガイドラインは、第三段階計画で定める実験炉としてのプラズマ性能及び工学性能と整合するものであり、同技術ガイドラインに基づけば、原型炉まで1ステップで到達できる実験炉が設計出来ると見込まれる。なお、今後、具体的な設計の進展に合わせた専門家による技術レビューは必要である。
- ・図4に、エネルギー増倍率及び定常運転性の指標である自発電流の割合について R C O の目標領域を示す。R C O は、定常運転原型炉を目指すアプローチに比重をおいた設計選択であり、我が国が先導して提示してきた定常型トカマク炉概念と、E D A 後期に実証され認識が定着した J T - 6 0 の先進的トカマクモード（負磁気シア高自発電流配位による臨界プラズマ）が強く反映された実験炉設計でもある。

別表－１：低コストオプションの技術ガイドラインと第三段階核融合研究開発基本計画

| 項 目      | 技 術 項 目                         | 低コストオプションのための技術ガイドライン                                                                                                                                          | 第三段階核融合研究開発基本計画                                                                                                                    |
|----------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 計 画 目 標  | 核融合エネルギーの科学的<br>及び技術的可能性の検証     | DEMOへの外挿性の確保<br>・DEMOまで１ステップ                                                                                                                                   | 第３段階の研究開発の中核を担う装置として、トカ<br>マク型の実験炉を開発する。これらの研究開発に<br>より、第四段階以降の研究開発に十分な見通しを得<br>ることを目標とする。<br>(「１．研究開発の目標」より)                      |
| プラズマ性能   | 制御された点火<br><br>燃焼時間<br><br>定常運転 | Qが最低でも１０以上<br>( $Q \rightarrow \infty$ の可能性も排除しない)<br><br>プラズマの置換が定常状態に達する時間スケールを<br>十分にカバーする<br>(運転方式で３００～５００秒)<br><br>非誘導電流駆動方式による定常運転を目指す<br>( $Q \geq 5$ ) | 自己点火条件(Qが２０程度)を達成することを目指<br>す。<br><br>定常炉心プラズマへの見通しを得るために必要と<br>考えられる長パルス運転(1000 秒程度以上)の実現<br>を目指す。<br><br>(以上「２．(１)炉心プラズマ技術」１)より) |
| 工学性能及び試験 | 核融合炉に不可欠な技術の<br>検証<br>炉工学機器の試験  | 超伝導磁石技術、遠隔保守技術等の検証<br><br>高熱負荷試験の試験、<br>原型炉ブランケット・モジュールの試験：<br>中性子負荷 $\geq 0.5\text{MW}/\text{m}^2$<br>中性子フルエンス $\geq 0.3\text{MWa}/\text{m}^2$                | 原型炉の開発に必要な炉工学技術の基礎の形成を<br>主要な目標。<br>実験炉の開発に必要な主要構成機器の大型化・高性<br>能化を図るとともに、実験炉による試験等を含めた<br>研究開発を進める。<br><br>(以上「２．(２)炉工学技術」より)      |



$Q = 10$



$Q = 20$

図1 RCO (IAM) の運転裕度(1)

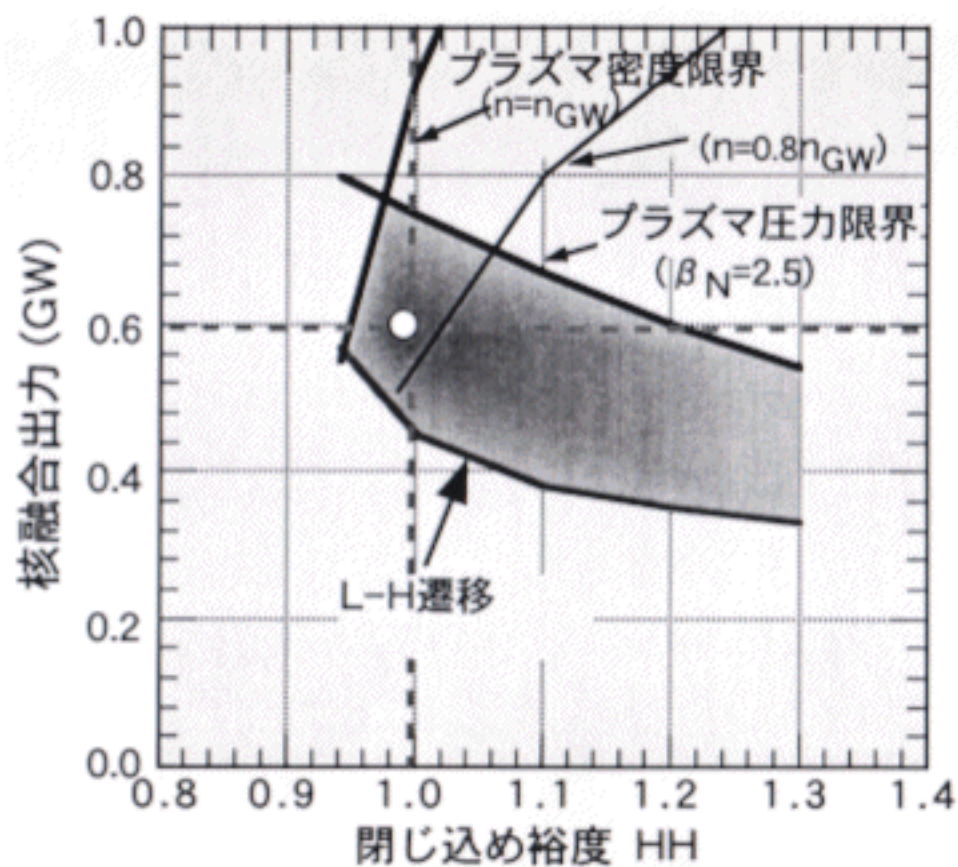


図2 RCO(IAM)の運転裕度(2)

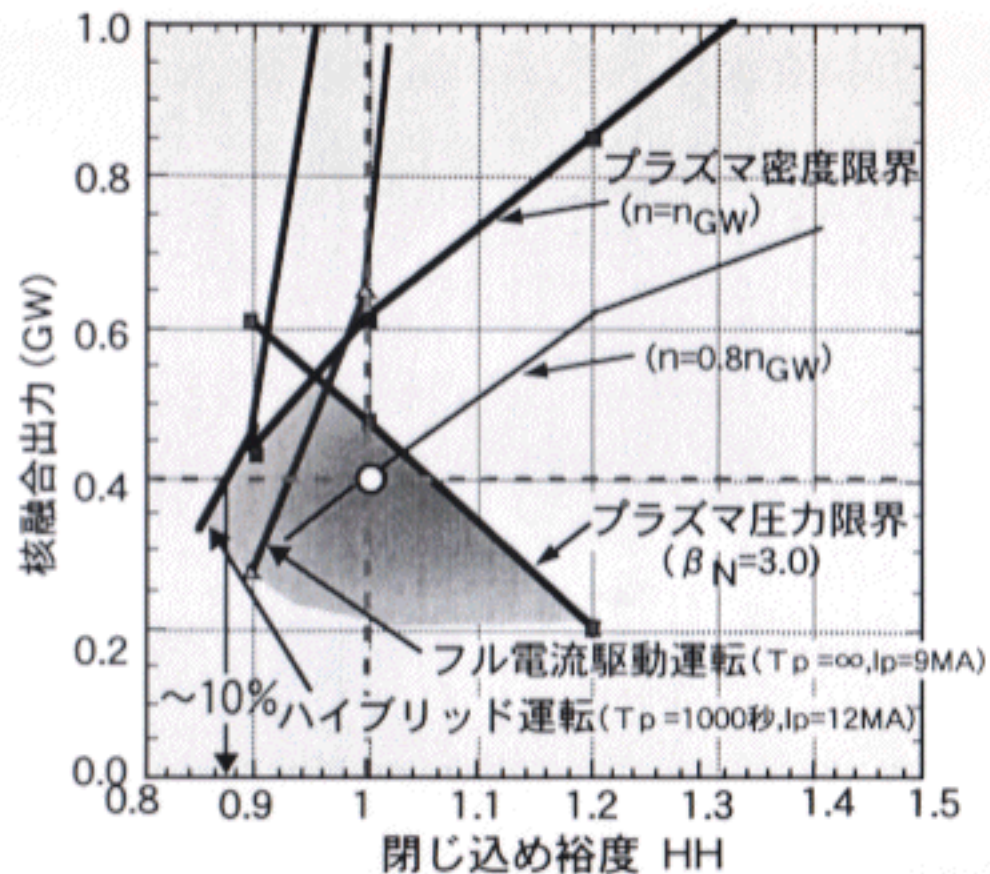


図3 RCO(IAM)の長パルス運転

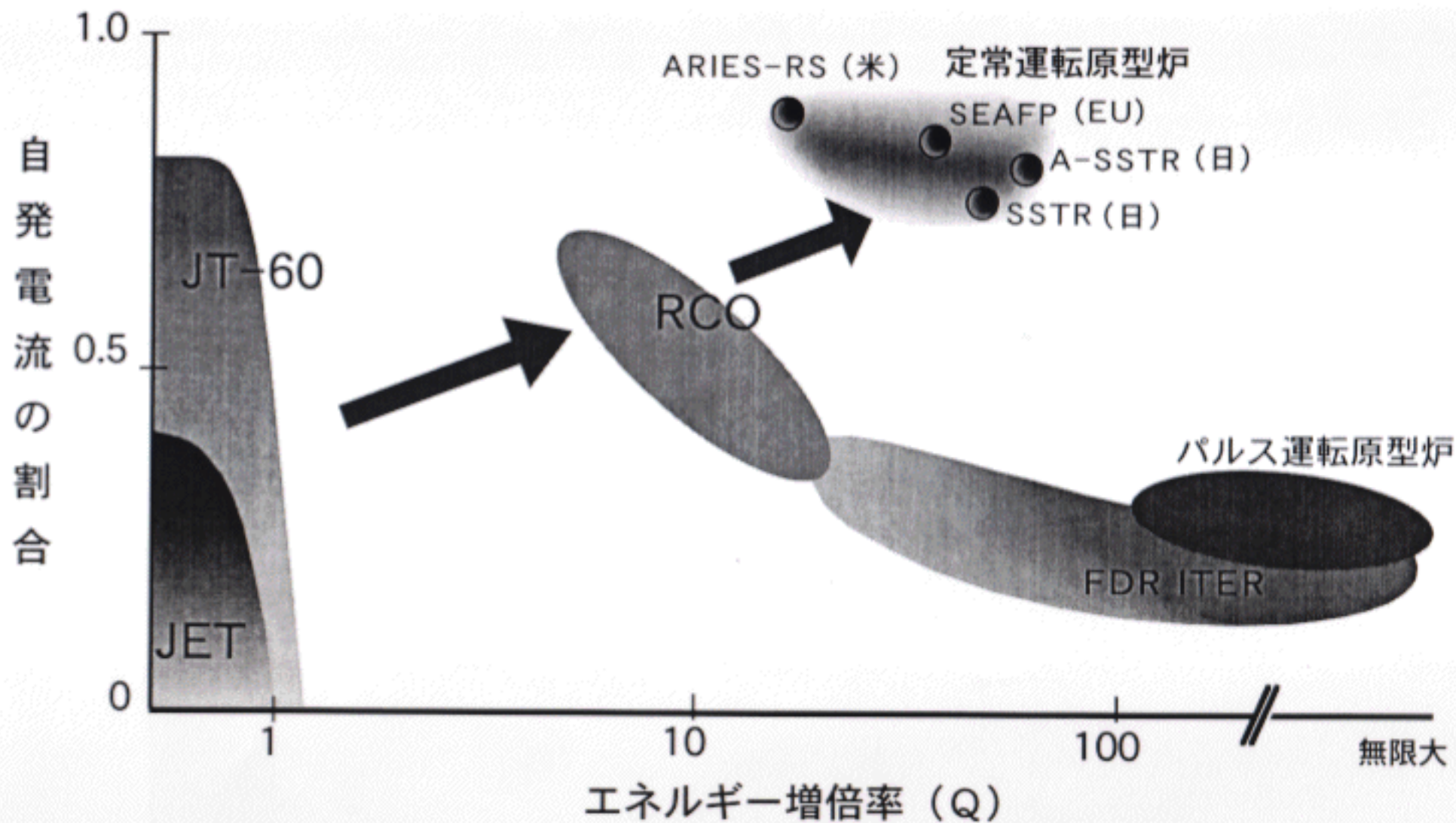


図4 RCO の位置づけ  
(FDR: 最終設計報告書)