

JAERI - M  
94-045

核融合システムの安全解析手法の開発 [I]

— 安全解析のための一般核融合  
システムのシステムモデル —

1994年3月

有可 光宏\*

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 原子力資料サービス

核融合システムの安全解析手法の開発 [ I ]

— 安全解析のための一般核融合システムのシステムモデル —

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

有可 光宏\*

(1994年2月7日受理)

核融合システムの安全上の特徴で、最も重要なものの一つは、災害ポテンシャルとなるエネルギーと RI (放射性物質) ソースがシステム内に分散しその一部は循環していることである。

このエネルギーソースの異常解放は、システム内の異常状態を招き、他のエネルギーソースの解放、システム内の放出されやすい放射性物質 (ソースターム) の量の増加、環境への漏洩経路 (リークパス) の形成に影響を与える可能性がある。しかし、分散型のシステムにおけるこれらの影響関係は、複雑であり、かつシステム全体にわたっている。

そこで、本研究では、これらの関係を整理し、異常の進展を定量的に解析する安全解析モデルを構築する。本報告では第1段階として、核融合システムモデルを作成した。

システムモデルは、一般的な核融合システムの安全上の特徴を記述できるように制御機能や空間、バウンダリなどの概念的システム構成要素から構成されている。そして、モデルに、通常運転時あるいは異常時のシステム構成要素の物質・エネルギーの蓄積や移動プロセスを整理し、システム構成要素間の相互関係を明確に定義している。

このシステムモデルを基に、事象シーケンスの定量的な解析と適切な安全機能の制御変数のサーベイが可能な数学モデルを作成中である。さらに、このモデルによるコンピュータプログラムは、支配的な事象シーケンスの選定と合理的な安全機能の提示のための有用なツールとなりうる。

Development of Safety Analysis Methodology for Fusion Systems [I]  
- System Model of General Fusion System for Safety Analysis -

Mitsuhiro ARIKA\*

Department of Fusion Engineering Research  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 7, 1994)

One of the most important safety characteristics of a fusion energy system is the fact that energy and RI (radioisotope) sources as a hazard potential are distributed over and some of them move around the system.

Abnormal release of these energy sources result in abnormal state of the system and may induce another energy release, an increase of vulnerable RI (source term) or a formation of flow path from system to environment (RI leak path). Moreover, these relationship is complex and extended over the system. Then, in this study, I will arrange these relationship in order and develop safety analytical model to be able to analyze system behavior quantitatively under abnormal conditions. In this report, I constructed a system model as the first stage of development of a comprehensive analytical model.

The system model is composed of conceptual system elements such as control functions, spaces and boundaries. This model describes the characteristics of general fusion systems in an overall sense. Then, I arranged in order the system model mass and/or energy transport or storage processes between system elements on normal and/or abnormal conditions and defined the inter-relationship precisely.

Based on the system model, a mathematical model is being developed.

---

\* Special Research Student to JAERI from Tokyo Institute of Technology, Graduate School of Science and Engineering, Nuclear Engineering Department

This mathematical model enables us to analyze system behavior quantitatively and survey parameters controlled by safety features. The mathematical model will be the basis to develop a computer program which will be a good tool for selection of dominant event sequences and request for rational safety features.

Keywords: General Fusion System, Source Term, Leak Path, Safety Analysis, System Model, Control Function, Boundary RI Sources, Energy Sources, Abnormal Event

## 目 次

1. はじめに .....	1
1.1 背景と研究目的 .....	1
1.2 システムモデルの作成方針 .....	3
2. 核融合システムモデルの作成 .....	7
2.1 システム構成要素の抽出 .....	7
2.2 システムモデル内のRIソースの分布 .....	19
2.3 システムモデル内のエネルギーソースの分布 .....	25
3. システムモデル内のエネルギー・物質フロー .....	30
3.1 真空エリアに関連するエネルギー・物質フロー .....	30
3.2 燃料エリアに関連するエネルギー・物質フロー .....	71
3.3 ブランケットエリアに関連するエネルギー・物質フロー .....	91
3.4 冷却材エリアに関連するエネルギー・物質フロー .....	106
3.5 廃棄物エリアに関連するエネルギー・物質フロー .....	115
3.6 格納エリアに関連するエネルギー・物質フロー .....	123
4. まとめ .....	131
謝 辞 .....	132
参考文献 .....	132

## Contents

1. Introduction .....	1
1.1 Background and Objectives .....	1
1.2 Method of System Model Development .....	3
2. Development of System Model .....	7
2.1 Selection of System Elements .....	7
2.2 Distribution of RI Sources in System Model .....	19
2.3 Distribution of Energy Sources in System Model .....	25
3. Energy and/or Mass Flows formed among System Elements .....	30
3.1 Energy and/or Mass Flows related to Vacuum Area .....	30
3.2 Energy and/or Mass Flows related to Fuel Area .....	71
3.3 Energy and/or Mass Flows related to Blanket Area .....	91
3.4 Energy and/or Mass Flows related to Coolant Area .....	106
3.5 Energy and/or Mass Flows related to Waste Area .....	115
3.6 Energy and/or Mass Flows related to Containment Area .....	123
4. Conclusion .....	131
Acknowledgement .....	132
References .....	132

## 1. はじめに

### 1.1 背景と研究目的

将来のエネルギーシステムとしての核融合システムが社会に受容されるためには、先行する原子力システムである核分裂システムと同等あるいはそれ以上に安全性を高める必要がある。そして、この安全に関する要求事項は、核融合システム、核分裂システムともに、主として放射能・放射線災害からの防護に着目することにより導出される。

エネルギーと放出される可能性のある放射性物質（以後R Iと略記する）のインベントリから考えると、総体的に核融合システムは低災害ポテンシャルのシステムである。特に工学的安全系の効果を考慮しない設計基準外事故（BDBEs）においては、核分裂システムに比べて容易に安全要求を達成できると言われている。しかしながら、それより発生頻度の大きい設計基準内の事象（DBEs）について安全要求を満たすには、何らかの安全防護対策をとる必要があるとも考えられている<sup>[1]</sup>。

このような安全防護対策を立てる場合には、対象とするシステムの特徴を把握し、その特徴を利用することが合理的である。そこで、核分裂、核融合システムの安全上の特徴を簡単にまとめると以下ようになる。

核分裂システムは、R Iソース、エネルギーソースがともに炉心に集中している災害源集中型のシステムであり、安全防護対策は主に炉心燃料とそれを囲むバウンダリの健全性に着目して行われる。

一方、核融合システムは、システム内にエネルギー生成・変換・輸送を行うサブシステムに加えて、燃料の生産・加工・処理を行うサブシステムから構成されている。そのため、R Iソースはシステム内に分散し、通常運転時においても種々のサブシステム間を移動している。更に、これらのサブシステムを機能させるために用いるエネルギーソースもシステム内に様々な形態で分散・流動しており、異常時にはR Iの移動化（＝放出されやすい形態への変化）やバウンダリ（＝R Iの放出を防ぐ障壁）の健全性に影響を与える可能性がある。このように、核融合システムはR Iとエネルギーがシステム内に分散している災害源分散型のシステムと特徴づけられる。

従って、核分裂システムのような災害源集中型のシステムで行われている炉心中心の安全防護対策とは違ったアプローチが、災害源分散型の核融合システムでは必要である。また、核融合システムでは、システム内の異常の起因から異常事象への進展方向は多岐にわたり、複雑な異常事象に発展する可能性があるため、安全防護対策を施すのに効果的なポイントを見い出す工夫も必要である。

このような背景から、核融合システムについて、システムの災害源を特定し安全防護のために考慮すべき代表的な事象シーケンスを抽出する試みと、そのための手法開発が行わ



れてきた<sup>〔1〕-〔5〕</sup>。

これらの研究は、システムの安全上の問題点を明確にすることに主眼が置かれている。つまり、設計基準事象、その他の言葉で定義されている代表事象の抽出、それらの事象に対する安全防護対策の定性的な提示、必要な安全研究課題の抽出等が主な作業内容となっている。

今後は、これらの作業に、事象シーケンスにおけるシステム挙動と安全機能による効果を考慮した定量的な解析を組み合わせ、最終的な設計基準事象（DBEs）の抽出とバランスのとれた合理的な安全設計要求を実際の設計に反映していく必要がある。

安全解析は、一般に解析対象のシステム内部で発生する物理現象をモデル化し、ある異常条件を仮定した計算により、異常時のシステム内挙動を定量化することである。この安全解析の結果は、同様の現象を模擬した実験結果とともに、対象システムの安全性の議論の拠り所となる。

現在までの核融合システムについての安全解析は、解析対象システムを一部に限定し、特定の設計を対象としたモデル解析を行う場合が多く、また、物理現象についても、特定の現象（熱流動、電磁誘導、化学反応等）に焦点を絞ったものが多い<sup>〔6〕-〔10〕</sup>。

これらの解析範囲を絞った詳細な解析は、その対象範囲内での厳密な解析結果を期待できる。しかしながら、それらの結果と安全上重要なRIの挙動とのカップリングを行えるものは少なく、また単に個々の詳細解析の結果から安全防護対策を施すことは、必ずしも合理的な安全設計を達成するものではない。

従って、システム全体を見通し、異常事象シーケンスのシナリオに従った定量的解析を行えるような総合的な安全解析プログラムの開発、あるいは個々の詳細解析結果をまとめてシステムの安全性を定量的に評価する手法の開発が必要である。このようなプログラム、手法の開発によって初めて災害源分散型である核融合システム全体の安全評価を行い、安全設計要求をバランスよく導き出すことが可能となる。

そこで、総合的な視点から核融合システムをとらえた安全解析・評価手法として開発されているのが、GEM-SAFE (General Methodology of Safety Analysis /Evaluation for Fusion Energy System) である<sup>〔4〕・〔5〕</sup>。本手法は合理的な安全性を有する理想的な核融合システムを提示することを目的としており、そのシステム安全性を評価するための設計基準事象（DBEs）の選定と安全設計要求としてのバランスのよい安全機能の提示をシステム全体にわたって論理的かつ見通しよく行うものである。本手法の開発は現在までに、定性的なシステム挙動評価に基づくDBEsの選定と安全機能の提示が可能になっている。この段階までの手法によって、いくつかの核融合システム設計への適用も行われている<sup>〔4〕-〔7〕</sup>。

次の手法開発段階としては、システム挙動の定量的解析を行い、それによって最終的なDBEsと安全機能を具体的に提示することである。つまり、前述の総合的な安全解析プログラムあるいは詳細解析結果をまとめていく手法の開発がGEM-SAFEのフレーム

ワーク上でも必要とされている。

そこで、このような安全解析プログラムを開発するための核融合システムのモデリングを研究目的とし、本報告では特に、モデリング第1段階として、定量的な安全解析に用いるシステムモデルの作成についての議論を展開する。

## 1.2 システムモデルの作成方針

システムモデルの作成では、核融合システムにおいて安全上考慮すべき特性は何かを検討し、重要であると考えられる特性をモデルの中に表現する必要がある。

これは、放射線・放射性物質の環境への不制御放出が起こるパターンがシステムモデルにおいて漏れなく抽出できる、つまり、不制御放出時に形成されるシステム内の放出されやすい形態のR I（以後ソースタームと呼ぶ）と環境中への放出経路（リークパス）の形成パターンの検討ができるということを意味する。

災害源分散型である核融合システムは Fig. 1-1に示すように、これらのソースタームの存在位置とリークパスの形成位置が、複数化、複雑化している。とはいっても、核分裂、核融合に係わらず、原子力システムの安全確保のためには、ソースタームを低減するために「R I制御性」、リークパス形成を阻止するために「バウンダリ健全性」、そして、それらをバックアップするために「格納健全性」を「守るべき」である。

核融合システムの場合、サブシステム間のバウンダリの破損が、環境側へのリークパスの形成には直接的には関連していないものがある。しかし、このようなバウンダリの破損時にはサブシステム間のエネルギー異常フローが形成され、連結されたサブシステム内にあるR Iが新たに移動化する（ソースタームが増加する）可能性と、R I障壁である他のバウンダリの破損（リークパス形成）を誘発する可能性がある。従って、このようなサブシステム間のバウンダリの健全性も「守るべき」アイテムである。

システムモデルには、これらの「守るべき」アイテムに関連するようなシステムを構成する要素（以後システム構成要素と呼ぶ）が漏れなく抽出されていなければならない。守るべきアイテムに関連するシステム構成要素には、システム内のR Iを保持するものやバウンダリ、R Iの移動化やバウンダリの破損に影響を与えるエネルギーを内蔵しているシステム構成要素がある。

GEM-SAFEにおいて、定性的なシステム挙動分析に用いたシステムモデルである一般記述モデルGDM(General Descriptive Model)は、核融合システムにおいて「守るべき」アイテム、特に「R I制御性」と「バウンダリ健全性」に関連するような「機能」、「作用物質」、「エリア」、「物質バウンダリ」等の概念的なシステム構成要素から構成された(Fig. 1-2 参照)。このことにより、GDMは多くのコンポーネントをまとめた包括的な表現が可能となり、設計基準事象(DBEs)を少ない数にまとめることができた。

さて、今回行う定量的なシステム挙動解析を行うためには、どのようなエネルギー・物

質（含R I）フローが、通常運転時あるいは異常時において、抽出されたシステム構成要素間に形成されるのか、そして、どのシステム構成要素に蓄積されていくのかが明確に示されていないなければならない。

しかしながら、GDMはエネルギー・R Iフロー（通常運転時・異常時）が明示されたシステムモデルにはなっていない。そこで、本報告では新たに定量的システム挙動解析用の核融合システムモデルの作成を行う訳である。この時、GEM-SAFEのGDMのように包括的なシステム表現を採り、その利点を生かすとともに、エネルギー・R Iソースの存在場所とエネルギー・R Iフロー（通常運転時・異常時）をGDMよりも詳細に図示する。

このことにより、モデリング第2段階である数学モデル作成において、システム内部のエネルギーあるいは物質の流出入・生成・消滅項をシステムモデルから見通しよく特定できるようになり、核融合システム内部の状態変化が解析可能な基礎方程式群を導出することができる。

このような方針に基づいて作成された定量的なシステム挙動解析モデルに用いるシステムモデルについて、以下に説明を行う。

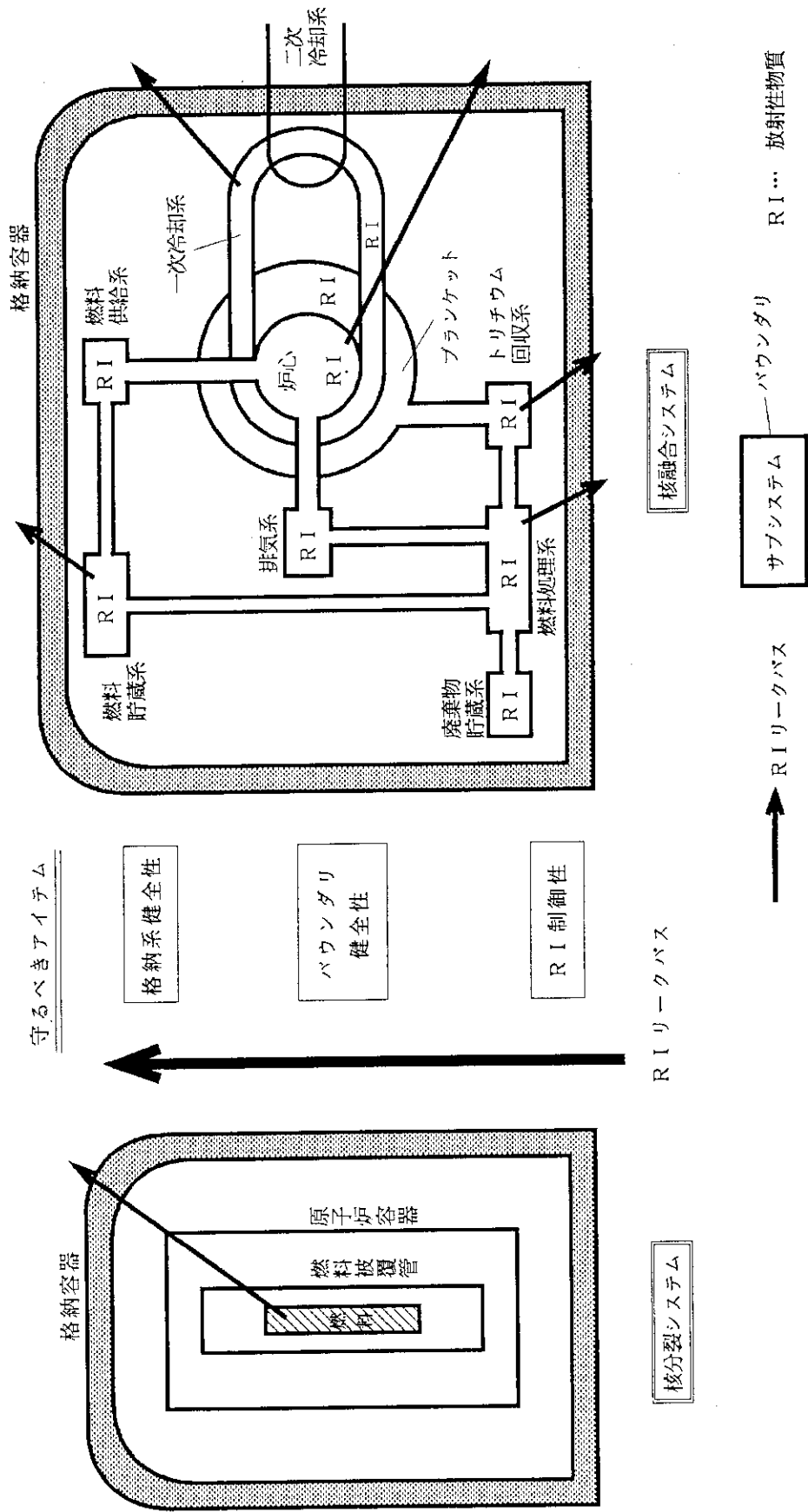


Fig. I-1 Difference of RI Leak mechanism between Fission system and Fusion system

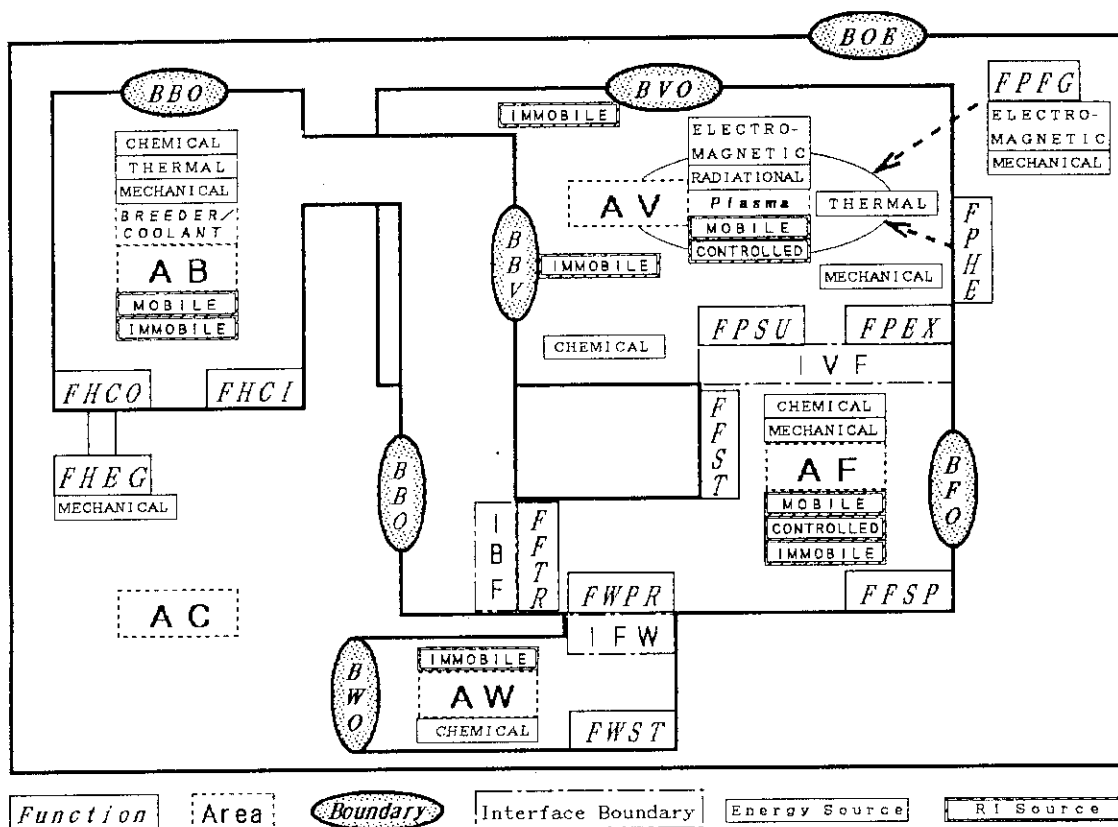


Fig. 1-2 General descriptive model (GDM)

Notation of Fig.1-2

<u>Functions (F.) &lt;12 kinds&gt;</u>	<u>Boundaries &lt;6 kinds&gt;</u>
FPPG Magnetic Field Generation F.	BVO Vacuum Area Boundary
FPHE Plasma Heating F.	BBO Blanket Area Boundary
FPEX Particle Exhausting F.	BFO Fuel Area Boundary
FPSU Fuel Supply F.	BWO Waste Area Boundary
FPCI Material Circulation F.	BBV Boundary between Blanket and Vacuum Area
FHCO Heat Conversion F.	BOE Boundary between Containment Area and Environment
FFSP Fuel Separation and Purification F.	
FFTR Fuel Transfer F.	<u>Interface boundaries &lt;3 kinds&gt;</u>
FFST Fuel Storage F.	IVF Interface Boundary between Vacuum and Fuel Areas
FWPR Waste Processing F.	IBF Interface Boundary between Blanket and Fuel Areas
FWST Waste Storage F.	IFW Interface Boundary between Fuel and Waste Areas
FHEG Electricity Generation F.	
<u>Areas &lt;5 kinds&gt;</u>	
AV Vacuum Area	
AB Blanket Area	
AF Fuel Area	
AW Waste Area	
AC Containment Area	

## 2. 核融合システムモデルの作成

核融合システムは現在開発段階にあるため、システム設計が確立されているわけではない。従って、本研究の核融合システムのモデリングでは、様々なシステム設計に含まれている安全上の問題を扱えるようにシステムモデルを構築する必要がある。

そこで、モデリング対象を一般的核融合システムとにおいて、核融合システムが備えるべき基本的機能に着目してシステムモデルを構築した。このシステムモデルを Fig. 2-1に示す。

以下にこのモデルについて説明する。このシステムモデルを構成する基本単位であるシステム構成要素の抽出について 2.1、核融合システム内部のR Iソースの分布をシステムモデル上にまとめたものを 2.2、核融合システム内部のエネルギーソースの分布をシステムモデル上にまとめたものを 2.3にそれぞれ示す。

### 2.1 システム構成要素の抽出

#### 2.1.1 GDMにおけるシステム構成要素の抽出

Fig. 2-1 中のシステム構成要素を抽出するために、核融合システムが本来的に必要としている「基本的機能」の抽出から始め、目的とするシステム内のエネルギーと物質のフローがシステムモデル上で表現可能となるまで、必要な設計の制約条件を加えて「基本的機能」を分解した。

この「基本的機能」の抽出においては、GEM-SAFEの一般記述モデル(GDM)構築のための3ステップのモデル化作業の結果が利用できる<sup>[4]</sup>。この作業では、核融合システムの目標を「核融合反応エネルギーを利用した発電生産」とし、第1段階の「物理モデル化」で以下の3つの「基本的機能」を導いている。

- (a) 核融合反応エネルギーを生成維持させる機能  
(Fusion Power Generation Function)、
- (b) 核融合反応エネルギーからエネルギーを輸送・変換して発電を行う機能、  
(Energy Conversion and Transport Function)
- (c) 核融合反応を起こす燃料の流れを制御・維持する機能  
(Fuel Cycle Function)

そして、第2段階の「規範モデル化」で、3つの基本的機能を実現するために必要な「機能」と「機能が作用する物質(以下、作用物質と呼ぶ)」を抽出している。この時、核融合反応方式、プラズマ閉じ込め方式、燃料サイクル方式、発電方式に対する設計制約条件を現在までの核融合開発の知見から、

- (1) D-T反応、

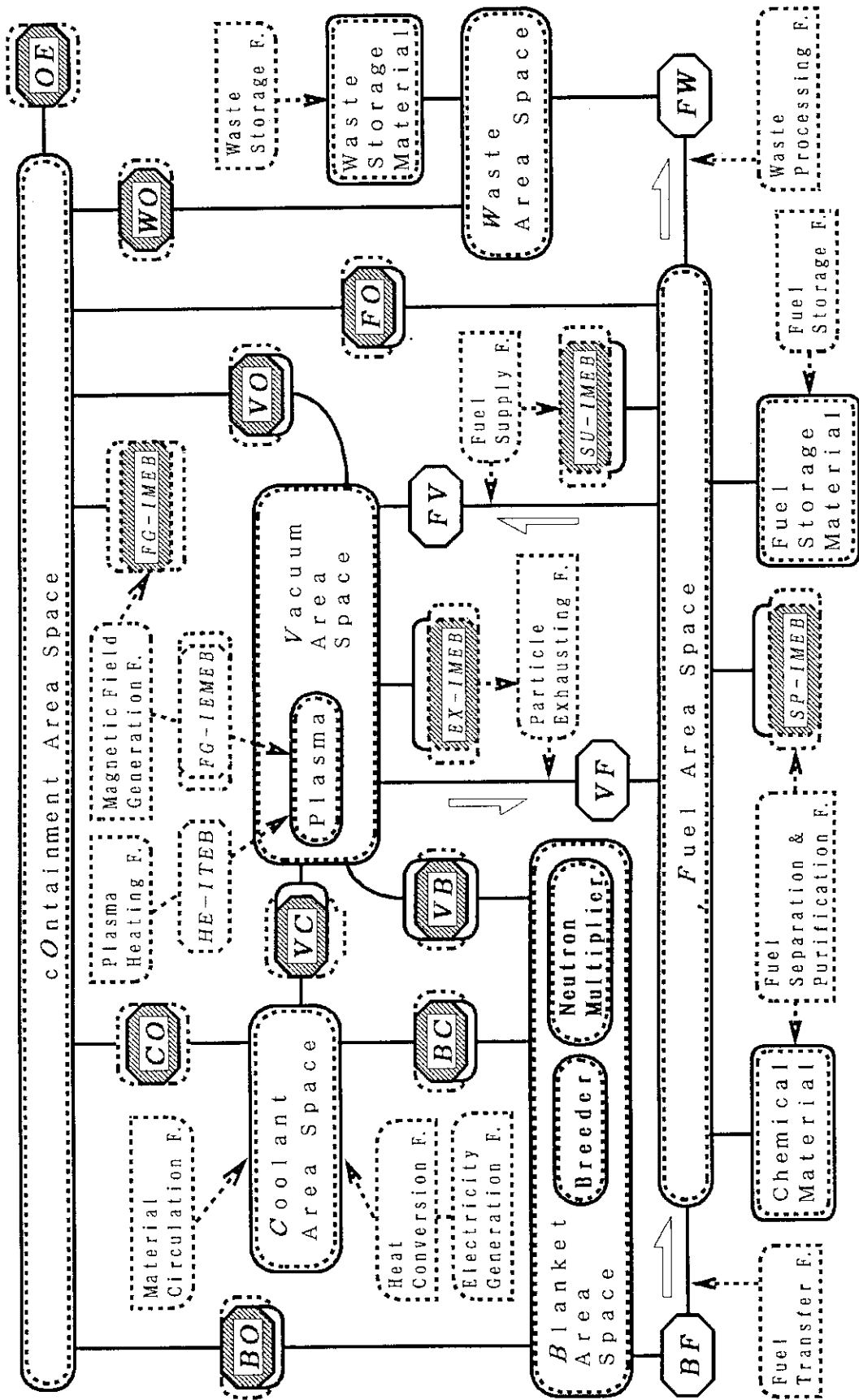


Fig. 2-1 System model of General Fusion Reactor

## Notation of Fig. 2-1

Material Boundaries

VO	Boundary between Vacuum and cOntainment areas
FO	Boundary between Fuel and cOntainment areas
WO	Boundary between Waste and cOntainment areas
BO	Boundary between Blanket and cOntainment areas
CO	Boundary between Coolant and cOntainment areas
VC	Boundary between Vacuum and Coolant areas
VB	Boundary between Vacuum and Blanket areas
BC	Boundary between Blanket and Coolant areas
OE	Boundary between cOntainment area and Environment
VF	Boundary between Vacuum and Fuel areas
FV	Boundary between Fuel and Vacuum areas
BF	Boundary between Blanket and Fuel areas
FW	Boundary between Fuel and Waste areas

Energy Boundaries

FG-IMEB	Boundary against abnormal release of Mechanical Energy Included in magnetic Field Generation function
FG-IEMEB	Boundary against abnormal release of ElectroMagnetic Energy Included in magnetic Field Generation function
HE-ITEB	Boundary against abnormal release of Thermal Energy Included in plasma HEating function
EX-IMEB	Boundary against abnormal release of Mechanical Energy Included in particle EXhausting function
SU-IMEB	Boundary against abnormal release of Mechanical Energy Included in fuel SUPply function
SP-IMEB	Boundary against abnormal release of Mechanical Energy Included in fuel Separation and Purification function



- (2) 磁場閉じ込め方式、
- (3)  $L_i$  による  $T$  増殖による自給型燃料サイクル方式、
- (4) 熱サイクルによる発電

という近い将来実現する可能性が高い核融合動力炉を想定して決定し、この条件に沿って、制御機能と作用物質を抽出している。

以下が抽出された機能と作用物質である。

(a) 核融合反応エネルギーを生成維持させる機能

- 機能 : 磁場形成機能 (Magnetic Field Generation Function)、  
 プラズマ加熱機能 (Plasma Heating Function)、  
 真空排気機能 (Vacuum Preparation Function)、  
 燃料供給機能 (Fuel Supply Function)、  
 灰排気機能 (Ash Removal Function)
- 作用物質 : 核融合反応物質 (Plasma)

(b) 核融合反応エネルギーからエネルギーを輸送・変換して発電を行う機能

- 機能 : 核融合反応によって生じたエネルギーを熱化する機能  
 (Energy Conversion (Deposition) Function)、  
 熱除去と輸送の機能 (Heat Removal Function)、  
 発電機能 (Electricity Generation Function)
- 作用物質 : 熱変換物質 (Heat Deposition Material)、  
 熱輸送物質 (Heat Transport Material)

(c) 核融合反応を起こす燃料の流れを制御・維持する機能

- 機能 : 燃料生産機能 (Fuel Production Function)、  
 燃料輸送機能 (Fuel Transport Function)、  
 燃料精製機能 (Fuel Purification Function)、  
 燃料分離機能 (Fuel Separation Function)、  
 燃料貯蔵機能 (Fuel Storage Function)、  
 廃棄物処理機能 (Waste Processing Function)、  
 廃棄物貯蔵機能 (Waste Storage Function)
- 作用物質 : 燃料生産物質 (Fuel Production Material)、  
 燃料物質 (Fuel Material)、  
 廃棄物質 (Waste Material)

以上のように、基本的機能を詳細化して、制御機能と作用物質を抽出した。但し、設計オプションによっては、熱輸送物質が燃料生産物質と熱変換物質を兼ねる場合 (液体  $L_i$

増殖／Li冷却設計)がある。

第3ステップの「記述モデル(GDM)化」では、規範化モデルにおける機能の中で能動的(active)な機能を「制御機能」として設定し、より具体的な表現が可能なものについては分解して設定している。そして、抽出された制御機能と作用物質が機能を発揮する「エリア」とエリアの空間的分離を行う「物質バウンダリ」「インターフェイスバウンダリ」を設定している。例えば、核融合反応エネルギーを生成維持させる機能の中の灰排気機能(Ash Removal Function)は、実際の設計では、ダイパータあるいはリミタが該当する機器であるが、能動的な機能部は、真空排気機能(Vacuum Preparation Function)に包含され、ダイパータ板等は物質バウンダリの一部と考えることができる。

このような3ステップのモデル化作業によって構築されるGEM-SAFEのシステムモデルGDMをFig. 2-2～2-4に示す。Fig. 2-2 は一般的核融合システムについてのGDM(熱輸送物質が燃料生産物質と熱交換物質を兼ねる場合)、Fig. 2-3 は熱輸送物質が燃料生産物質と熱交換物質とは別の物質である場合(固体Li増殖設計)のGDMである。さらに、Fig. 2-4 はGEM-SAFE適用時の例として、ITER-CDA設計のシステムをGDMで表現したものである。Fig. 2-3 は、Fig. 2-2 に冷却材エリアが加わっており、Fig. 2-4 はFig. 2-3 に冷却材エリアと燃料エリアとの間のRIの移行(冷却水からのトリチウム連続回収)を考えてインターフェイスバウンダリITFが加わっている。

本研究のシステムモデル作成においては、上記のGDMの内、Fig. 2-3(熱輸送物質が燃料生産物質と熱交換物質とは別の物質である場合のGDM)におけるシステム構成要素を利用する。

## 2.1.2 エネルギー・物質フロー明確化のためのシステム構成要素の抽出

異常時のシステム内挙動の定量的解析では、「守るべき」アイテムに関連するシステム構成要素への負荷とそれに対する応答を解析する必要がある。

それには、システムモデル作成において、まず「RI制御性」や「バウンダリ健全性」に関連するシステム構成要素を明示しておかなければならない。

これらの要素が「RI制御性」や「バウンダリ健全性」を喪失するのは、これらの要素の状態異常によるので、状態異常の原因となるようなシステム構成要素に形成されているエネルギーと物質(含RI)のフローを明らかにする必要がある。このために、システム内で形成されるエネルギー・物質フローの始「点」、終「点」となるシステム構成要素を明確にモデル上に示しておかなければならない。

GDMでは、「バウンダリ健全性」に関連するシステム構成要素は「物質バウンダリ」と「インターフェイスバウンダリ」であるが、「RI制御性」に関連するシステム構成要素については、RIソースを厳密にシステム構成要素に分配することは行わないで、「エリア」ごとに移動性の大きさで分けたRIソース(易動性、機能制御性、難移動性)の何が存在しているかを示していた。また、システム内で形成されるエネルギー・物質フロー





の始「点」、終「点」となるシステム構成要素も必ずしもモデル図上では明示されていない。

そこで、今回のシステムモデル構成では、第3ステップの「記述モデル（GDM）化」よりも第2ステップからのシステム構成要素の細分化を上記の視点から行うことにする。

「バウンダリ健全性」に直接的に関連するシステム構成要素は物質バウンダリである。バウンダリ破損が起こった場合の始「点」と終「点」として、バウンダリが隔っていたエリア内に「エリア空間」を設定する（この時物質バウンダリは中継「点」）。つまり、「エリア空間」を各エリアのソースタームを含むシステム構成要素と定義する。

「RI制御性」を評価するためにRIソースを保持するシステム構成要素としては、ソースタームとなっている移動性の高いRIソースは「エリア空間」にある。そして、移動性の低いRIは、物質バウンダリや作用物質、制御機能に保持されていると考える。

また、システム内のエネルギー・物質フローの始「点」と終「点」になるシステム構成要素は物質バウンダリ、エリア空間、作用物質、制御機能である。

このうち、制御機能により形成される異常エネルギーフローには、制御機能の「機能の喪失」によって、

- ①通常運転時に形成されていたフローの流量が異常変化する場合と
- ②通常運転時には形成されていなかった方向へのフローが形成される場合

がある。

このような機能の喪失による異常フローの種類を考慮するために、12の制御機能と、これらの機能を発揮する機器オプションとの対応付けを行い、制御機能が内包するエネルギーで安全上考慮すべきものを Table 2-1 に示した。

そして、これらのエネルギーソースは「機能制御部」に内包されているとし、他のシステム構成要素との間の異常なエネルギーフローを遮断する境界として、「機能内部エネルギーバウンダリ」を設定した。また、特に機器において化学反応性の物質を用いるものについては、システムモデルに化学エネルギーソースを内包している物質として、これらとは別に「機能内部物質」を設定して、GDMよりも機能について細分化されたシステム構成要素を抽出した。

行った作業について、Table 2-1 中の磁場形成機能を例にして説明する。磁場形成機能と対応付けを行う設計オプションは、将来的には超電導コイルとコイルの超電導状態を作る冷凍系からなる超電導コイル系である。この超電導コイル系で安全上考慮すべき問題は、コイルからの電磁エネルギーの異常解放であり、冷凍系からの冷凍材エンタルピーの放出（機械エネルギーの異常解放）であるといわれている〔8〕。

そこで、磁場形成機能は2つのエネルギーソースを磁場形成機能制御部に内包していると考え、各エネルギーの解放先との間に中継「点」となる機能内部エネルギーバウンダリとして、FG-IEMEB（電磁エネルギーバウンダリ）とFG-IMEB（機械エネルギーバウンダリ）を設定した。

Table 2-1 Functions and Related system elements

制御機能	機能内に内包されているエネルギー	機能内要素	対応する機器のオプション
磁場形成機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>電磁エネルギー</li> <li>冷凍材エンタルピーによるエネルギー (機械エネルギー)</li> </ul>	内部エネルギーバウンダリ (電磁エネルギー) (機械エネルギー)	超電導磁場コイル ; コイル回路 冷凍系
プラズマ加熱機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱エネルギー</li> </ul>	内部エネルギーバウンダリ (熱エネルギー)	NBI ; イオン源、ビームライン等 RF ; ドライバ、伝送、ランチャー系
粒子排気機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>機械エネルギー</li> <li>冷凍材エンタルピーによるエネルギー (機械エネルギー)</li> </ul>	内部エネルギーバウンダリ (機械エネルギー)	機械式ポンプ ; クライオパナネル 冷凍系
燃料供給機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>機械エネルギー</li> <li>冷凍材エンタルピーによるエネルギー (機械エネルギー)</li> </ul>	内部エネルギーバウンダリ (機械エネルギー)	ガスパフ ; リザーバタンク等 ペレットインジェクタ ; 入射装置、入射用ガス ペレット製造機、冷凍材タンク
熱輸送物質循環機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>機械エネルギー</li> </ul>	—	循環ポンプ
熱交換機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱エネルギー</li> </ul>	—	蒸気発生器、復水器、給水ポンプ
発電機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>機械エネルギー</li> <li>電磁エネルギー</li> </ul>	—	蒸気タービン、発電機
燃料精製分離機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱エネルギー</li> <li>冷凍材エンタルピーによるエネルギー (機械エネルギー)</li> <li>化学エネルギー</li> </ul>	内部エネルギーバウンダリ (機械エネルギー) 化学反応性物質	<ul style="list-style-type: none"> <li>不純物除去プロセス パラジウム合金膜 酸化触媒</li> <li>トリチウム水分解プロセス</li> <li>同位体分離プロセス 深冷蒸留塔 コールドトラップ 低温MSベベット等</li> </ul>
燃料輸送機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>機械エネルギー</li> <li>熱エネルギー</li> </ul>	—	移送ポンプ 熱交換器、ヒーター
廃棄物処理機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>機械エネルギー</li> </ul>	—	移送ポンプ
燃料貯蔵機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱エネルギー</li> <li>化学エネルギー</li> </ul>	燃料貯蔵物質	金属ゲッター、トリチウム水 温度制御系 (ヒーター、冷却系)
廃棄物貯蔵機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱エネルギー</li> <li>化学エネルギー</li> </ul>	廃棄物貯蔵物質	金属ゲッター

FG-IMEBは通常運転時にプラズマとの間に制御された電磁エネルギー流れを形成しており、一方、FG-IMEBは通常運転時には機械エネルギーを解放先から遮断している。つまり、物質バウンダリと同様に、機能内部エネルギーバウンダリも通常運転時にエネルギーフローを形成しているものと遮断しているものがあることになる。

制御機能でRIを保持するものについては、「機能内部エネルギーバウンダリ」あるいは「機能内物質」が制御機能のRIの保持システム構成要素を兼ねると考える。

以上のような視点からシステム構成要素として以下のものを抽出した。

#### 「エリア空間」

…真空エリア空間  
燃料エリア空間  
ブランケットエリア空間  
冷却材エリア空間  
廃棄物エリア空間  
格納エリア空間

#### 「物質バウンダリ」

…真空-格納エリア間物質バウンダリ (VO)  
真空-燃料エリア間物質バウンダリ (VF、FV)  
真空-ブランケットエリア間物質バウンダリ (VB)  
真空-冷却材エリア間物質バウンダリ (VC)  
燃料-格納エリア間物質バウンダリ (FO)  
燃料-ブランケットエリア間物質バウンダリ (BF)  
燃料-廃棄物エリア間物質バウンダリ (FW)  
ブランケット-格納エリア間物質バウンダリ (BO)  
ブランケット-冷却材エリア間物質バウンダリ (BC)  
冷却材-格納エリア間物質バウンダリ (CO)  
廃棄物-格納エリア間物質バウンダリ (WO)  
格納エリア-外部環境間物質バウンダリ (OE)

#### 「制御機能制御部」

…磁場形成機能制御部、プラズマ加熱機能制御部、粒子排気機能制御部、燃料供給機能制御部、熱輸送物質循環機能制御部、熱変換機能制御部、発電機能制御部、燃料精製分離機能制御部、燃料輸送機能制御部、廃棄物処理機能制御部、燃料貯蔵機能制御部、廃棄物貯蔵機能制御部

#### 「制御機能内部エネルギーバウンダリ」

…磁場形成機能内部電磁エネルギーバウンダリ (FG-IMEB)  
磁場形成機能内部機械エネルギーバウンダリ (FG-IMEB)  
プラズマ加熱機能内部熱エネルギーバウンダリ (HE-ITEB)  
粒子排気機能内部機械エネルギーバウンダリ (EX-IMEB)  
燃料供給機能内部機械エネルギーバウンダリ (SU-IMEB)  
燃料精製分離機能内部機械エネルギーバウンダリ (SP-IMEB)

#### 「制御機能内部物質」

…燃料精製分離機能内部化学反応性物質

燃料貯蔵物質内部燃料貯蔵物質  
 廃棄物貯蔵機能内部廃棄物貯蔵物質

2.1.3 システムモデル図におけるシステム構成要素の表記方法

2.1.2のように、システムモデル上でエネルギーと物質（含RI）フローを示すために必要なシステム構成要素を抽出した。これらのシステム構成要素は、エネルギーフロー、物質フロー上で複数の働きを持つ「点」として存在しているものがある。そこで、システムモデル図の中では、このようなシステム構成要素の複数の働きを表すように、以下のような記号を用いた。

まず、システム内に形成されるエネルギー・物質（含RI）フロー上において始「点」、終「点」となるシステム構成要素で、エネルギーあるいは物質を内部に蓄積するような要素を以下のように示す。

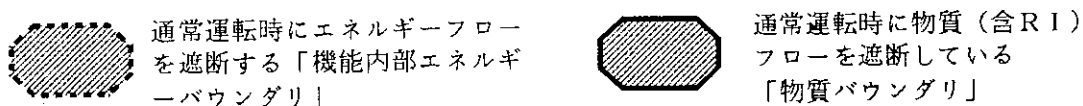


但し、制御機能の「機能制御部」は、機能の持つエネルギーの放出源、つまりエネルギーフローの起「点」としてのみ働くので、特に右のように表示することにする。

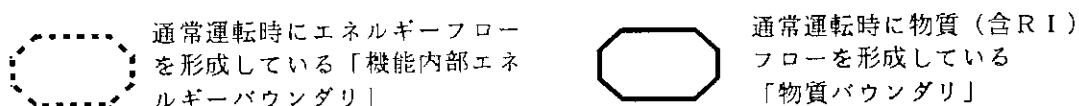


次に、「物質バウンダリ」と「機能内部エネルギーバウンダリ」は、通常運転時にフローを遮断するものと通常運転時にも制御されたフローを形成しているものがあり、それぞれ以下のように表示することにする。

①通常運転時にはバウンダリによってフローが遮断されているもの



②通常運転時にバウンダリを通じて一定のフローが形成されているもの



GDMでは、物質バウンダリでこのような区別があり、①をバウンダリ、②をインターフェイスバウンダリとし、それぞれ以下のように図示していた。



システム構成要素で、①の物質バウンダリに該当するのは、VO、FO、WO、BO、



CO、VC、VB、BC、OEであり、エネルギーバウンダリでは、FG-IMEB、EX-IMEB、SU-IMEB、SP-IMEBが該当する。また、②の物質バウンダリには、VF、FV、BF、FW、エネルギーバウンダリには、FG-IMEB、HE-ITEBが該当する。

このような記号を組み合わせることでシステム構成要素を表し、システムモデルを図示する。例えば、AエリアとBエリアの物質バウンダリがエネルギーを蓄積する要素であり、かつBエリア側面にRIソースを保持する要素である場合には、システムモデル上でのABバウンダリは以下のように表される。

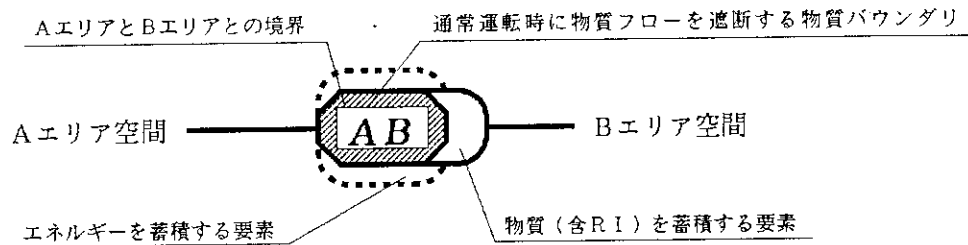


Fig. 2-1 は、システム構成要素の空間的な結合関係を明らかにすることを目的とした図であり、実線分でシステム構成要素間のつながりを表している。また、矢印はそれぞれ以下のような意味で図示している。



ここで、改めてシステムモデルのシステム構成要素の種類をまとめる。

### 「エリア」

…システム内部の作用物質が機能を発揮する領域を表す要素。いくつかのシステム構成要素により構成される。例えば、真空エリアはプラズマ、真空エリア空間、燃料供給機能（制御部、内部機械エネルギーバウンダリ）、粒子排気機能（制御部、内部機械エネルギーバウンダリ）、物質バウンダリVO、VB、VCから構成されている。

### 「物質バウンダリ」

…「エリア」を区切る境界となる要素。物質バウンダリには、①通常運転時にエリア間の物質フローを遮断していて、破損によって初めて物質フローが形成されるような物質バウンダリと、②通常運転時に制御機能によって制御された物質フローが形成されているような物質バウンダリがある。

実際の設計で考えると、①の物質バウンダリは何らかの壁で区切られた部分にあたる。また、②の物質バウンダリは一定の流路抵抗を持った貫通部にあたり、貫通部近傍に貫通部を通る物質フローを制御するような機器が設置されている。

また、物質バウンダリの中には、真空ブランケットエリア間バウンダリ（VB）の

ように、特定のエネルギーソース（崩壊熱、化学反応性のPFC材）を内包しRIソース（トリチウム、放射化材）を保持しているものもある。

#### 「エリア空間」

…「エリア」内部でソースタームを保持している要素。真空エリア空間とプラズマのようにエリア内で作用物質と区別する場合と、燃料エリア空間のように作用物質（燃料）がエリア空間内に含まれる場合がある。

#### 「制御機能」

…作用物質に対する制御を行う要素。以下の3要素に更に分解される。

##### 「機能制御部」

…「制御機能」が制御に用いるエネルギーソースを内包している要素。例えば、プラズマ加熱機能制御部には、プラズマ加熱機能の機器オプション（NBI、RF）に係わらずプラズマ加熱に用いられる熱エネルギーが内包されている。

##### 「機能内部エネルギーバウンダリ」

…「機能制御部」からシステム内部へ形成されるエネルギーフローを中継する要素。

「制御機能」外のシステム構成要素と直接的な相互関係（エネルギー・物質フロー）を持つ。粒子排気機能の機械エネルギーバウンダリのように、RIソース（吸着トリチウム）を保持する要素となるものもある。

##### 「機能内部物質」

…「機能制御部」からのエネルギーフローによる制御により、一定の化学反応を用いて作用物質の直接的な制御を行う要素。燃料貯蔵機能の燃料貯蔵物質のように化学エネルギーソース（金属水素化物）を内包したり、RIソース（吸収トリチウム）を保持するものもある。

## 2.2 システムモデル内のRIソースの分布

### 2.2.1 RIソースの種類

核融合炉システム内には主なRIソースとして、中性子の照射によってできる誘導放射化生成物、燃料物質としてのトリチウムの2種類の放射性物質がある。これらのRIソースはシステム内に分散し、かつ場所によって種類、化学的形態、移動性、圧力、温度などが変化している。従って、RIソースは、これらの点に注目して評価する必要がある。

環境へ放出されるRIの量と時定数は移動性に依存するので、RIソースの移動性は安全の重要な視点である。

従って、核融合システムにおいてRIソースを移動性に基づき、易動性、機能制御性、難移動性の3つのタイプに分類する。

易動性 R I は、バウンダリの破損により容易に放出される R I として定義される。この R I は、温度、圧力等の一定のパラメーターによって直接的に移動性を制御することはできないものである。易動性 R I には、システム内を循環するトリチウムガス、システム内の放射化ダスト、冷却材内の R I 等がこれに該当する。

機能制御性 R I は、制御機能により、その移動性を直接的に制御でき、機能喪失により移動化する R I ソースとして定義される。クライオポンプのクライオパネル上に吸着されたトリチウムや深冷蒸留塔内の液化トリチウム等は、制御機能による低温維持を行うことによって移動性が制御されており、これらは機能制御性 R I である。

難移動性 R I は、移動性が低くかつ制御機能による直接的な移動性制御効果の低い R I ソースとして定義される。構造材中の誘導放射能、金属水素化物内のトリチウム、増殖材中のトリチウムは難移動性 R I に分類される。

## 2.2.2 R I ソースの分布とシステムモデルへの配置

システムモデル内の R I ソースの分布を Table 2-2 と Fig. 2-5 に示す。図の中で、易動性 R I、機能制御性 R I、難移動性 R I はそれぞれ以下のように表示される。

M 易動性 R I (Mobile RI)
     
 C 機能制御 R I (Controlled RI)
     
 I 難移動性 R I (Immobile RI)

それぞれのエリアの、どのシステム構成要素に R I ソースが保持されているかについて以下にまとめる。

### a. 真空エリア内システム構成要素の R I ソースの分布

真空エリア内の易動性 R I としては、プラズマとエリア空間内のトリチウムが考えられる。ここで、真空エリア内の作用物質であるプラズマとエリア空間を分けたのは、それぞれが持つエネルギーソースの違いからである。プラズマ内部のトリチウムはイオンとして存在し、トリチウムイオン密度とプラズマイオン温度によってその状態を特定できる。一方、真空エリア空間内の易動性 R I はガス状で存在しており、トリチウム気体密度と気相温度でその状態を特定できる。

また、特にカーボン材等をプラズマ対向材に用いる設計では、真空容器内にトリチウムを含んだダストが蓄積される恐れがあり、易動性 R I として、ダストを考慮する必要がある。ITER の CDA では、カーボン材の場合 1000g、タングステン材の場合 100g のトリチウムがダストに含まれると概算している<sup>[9]</sup>。

次に、真空エリア内の機能制御性 R I の存在を考える。制御機能のうち機能制御性 R I を制御する設計オプションを持つのは、真空エリアと燃料エリアの境界の真空エリア側に設置される粒子排気機能がクライオポンプを含む場合である。ITER の CDA では、排気系に機械式（ターボ分子ポンプ）あるいはクライオポンプの採用を考慮しており、クラ

Table 2-2 RI Sources on System model of General Fusion Reactor

R I ソ ー ス			
	易動性RI (Mobile RI)	機能制御性RI (Controlled RI)	難移動性RI (Immobilized RI)
真空エリア (AV)	プラズマ内トリチウム (イオン) 空間内トリチウム (気体) 空間内PFCダスト	粒子排気機能内部 エネルギーバウンダリ内トリチウム (吸着)	VC, VB, VOバウンダリ真空エリア側面内 トリチウム、放射化物 (吸収、放射化)
燃料エリア (AF)	空間内トリチウム (気体)	燃料供給機能内部 エネルギーバウンダリ内トリチウム (冷凍固化)	FOバウンダリ 燃料貯蔵物質内 トリチウム (吸収)
廃棄物エリア (AW)	空間内トリチウム (気体)	_____	廃棄物貯蔵物質内 トリチウム (吸収)
ブランケットエリア (AB)	空間内トリチウム (気体)	_____	増殖材、 中性子増倍材内 トリチウム (吸収) BC, VB, BOバウンダリ ブランケットエリア側面内 トリチウム、放射化物 (構造材等吸収、放射化)
冷却材エリア (AC)	冷却水内トリチウム (溶存) 放射性腐食生成物	_____	_____
格納エリア (AO)	_____	_____	_____

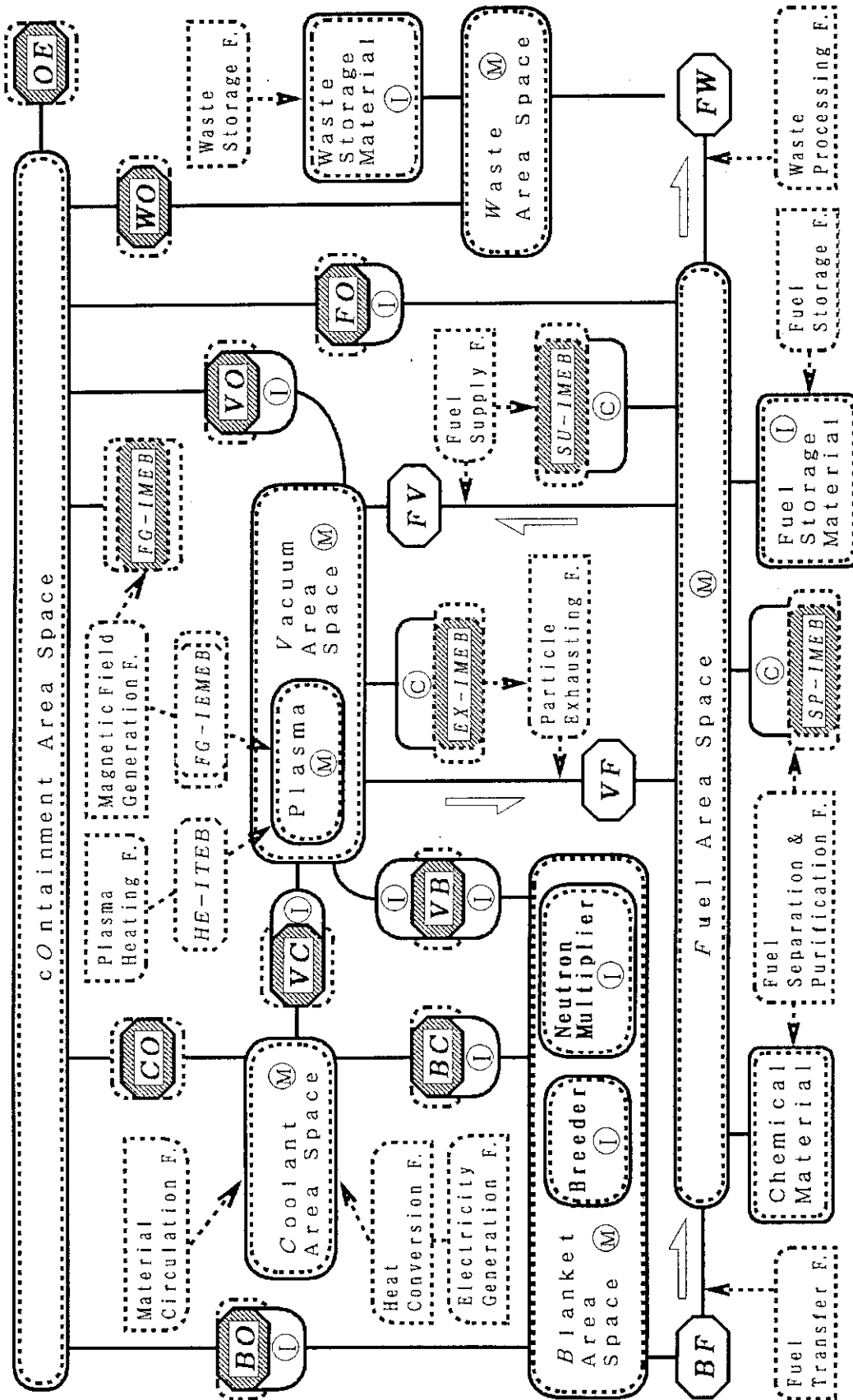


Fig. 2-5 RI Source Distribution in the System model

イオンプンプ採用時には約150gのトリチウムインベントリを想定している。また、これらの一次ポンプ系のBacking/Roughingポンプ（Cryotransfer cascade使用時）のインベントリも約30~487gを想定している〔9〕〔10〕。そこで、粒子排気機能を具体化する機器オプションにクライオポンプが一部採用される場合に備えて、粒子排気機能内部エネルギーバウンダリにトリチウムが保持されていると考える。このトリチウムは、粒子排気機能の機能喪失あるいは隣接する真空エリア空間の状態異常が原因となって移動化する可能性を持つ。

真空エリア内の難移動性RIは、主にプラズマ対向機器内に存在している。対向機器の構造材にはトリチウムが吸収され、あるいは中性子照射によって構造材そのものが放射化されているものがある。システムモデルでは、真空エリアの物質境界である物質バウンダリのうちVC、VB、VOの真空エリア側面がこのようなトリチウムインベントリを有しているとする。これらのトリチウムは、異常進展におけるバウンダリ状態の異常によって移動化する可能性を持っている。

#### b. 燃料エリア内システム構成要素のRIソース分布

燃料エリア内の易動性RIは、燃料エリア空間、つまり真空エリアと増殖材エリアから移送されてきた燃料含有混合物を純粋な燃料まで精製分離するプロセスの移送空間に存在している。このエリア空間には主に気体状のトリチウムが存在しており、RIの状態は、エリア空間のトリチウム気体密度と気相温度で特定できる。

燃料エリアに関連する制御機能は様々な設計オプションが存在し、選択された設計によってRIソースの分布も変わってくる。

そこで、燃料エリアにおけるトリチウムプロセスの中で、低温運転で液体あるいは固体のトリチウムの滞留がある機器を代表して燃料精製分離機能内部エネルギーバウンダリに機能制御性RIが保持されているとした。機器では、燃料精製プロセスの触媒酸化法における低温モレキュラーシーブベッド、吸収・吸着法におけるコールドトラップ、同位体分離プロセスの深冷蒸留法における深冷蒸留塔などがこれに該当する。

他にも機能制御性RIを保持する要素として、燃料供給機能内部エネルギーバウンダリを想定した。機器対応としては、燃料供給前の純粋な燃料を保持しているペレットインジェクタのリキッドチェンバー等がこれに該当する。

また、燃料精製・同位体分離プロセスにおいて酸化あるいは還元反応を行うための物質で異常な化学反応を引き起こす可能性のある物質を使用する場合に備えて化学反応性物質を要素として摘出しているが、化学反応性物質内のトリチウムインベントリは機能内部エネルギーバウンダリに比べて少ないと考えてインベントリはないものとする。

難移動性RIを保持する要素として、燃料貯蔵機能内部物質である燃料貯蔵機能と物質バウンダリFOを想定している。燃料の貯蔵は、金属水素化物による貯蔵、 $T_2O$ による貯蔵、ガスによる貯蔵があるが、ここでは燃料貯蔵物質は金属水素化物を想定している。また、物質バウンダリFOは、機器では燃料サイクル内の配管に対応する。配管に付着し

ているトリチウムについては文献 [9]、[10]等のITERのトリチウムインベントリでは言及されていないが、エリア空間のトリチウム濃度、エリア空間と接する配管表面積の大きさから、FOにもトリチウムインベントリを一応想定すべきである。

ガスパuffingによる燃料供給、ガス形態による燃料貯蔵時には、機器としてはタンクのようなものに一定量の移動性RIが封入されているが、これらのインベントリはエリア空間内にあるものとして考える。

従って、燃料エリア内の機能制御性RIは、燃料精製・分離機能内部エネルギーバウンダリと燃料供給機能内部エネルギーバウンダリに保持されている。また、難移動性RIは、燃料貯蔵機能内燃料貯蔵物質と物質バウンダリFOに保持されていると考え、それぞれの要素とエリア空間の状態異常によって、このRIソースが移動化する可能性がある。

#### c. ブランケットエリア内システム構成要素のRIソースの分布

ブランケットエリアは、2.1.2で述べたように固体増殖材を用いる設計と液体増殖材を用いる設計とでエリア構成が変わる。

まず固体増殖材使用、つまりブランケットエリア≠冷却材エリアの場合には、ブランケットエリアは増殖材、中性子増倍材、そしてトリチウム回収用のパージガスが充填されたブランケットエリア空間からエリア内部は構成される。

そして、エリア空間には増殖材、増倍材等から回収したガス状のトリチウムが含まれており、易動性RIとしてエリア空間内に保持されていることになる。そしてその状態は、トリチウム気体密度と気相温度で特定できる。

また、増殖材と中性子増倍材、そして物質バウンダリのうちBC、VB、BOのブランケットエリア側面に、トリチウムが難移動性RIとして保持されており、それぞれの要素とエリア空間の状態異常により移動化する可能性がある。

液体増殖材使用、つまりブランケットエリア=冷却材エリアの場合には、エリアは液体増殖材で満たされており、内部に易動性RI（増殖によるトリチウム）が保持されていると考えられる。

#### d. 冷却材エリア内システム構成要素のRIソースの分布

トリチウムは、壁やブランケットの配管を透過して冷却材中に溶存する可能性がある。この冷却材中のトリチウムは、たとえ液相内に溶存していても物質バウンダリ破損により直ちにRIの放出が成立するので、易動性RIであると考え。このRIの状態は、トリチウム液体（あるいは気体）内密度と液相（気相）温度で特定できる。また、冷却材の中には放射性腐食生成物（ $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{56}\text{Mn}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{55}\text{Fe}$ 等）が含まれる場合があり、易動性RIとして考慮する必要がある。

冷却材エリアのバウンダリ（CO、BC、VC）の冷却材エリア側面は、通常時にはエネルギーポテンシャルとしては低いと考えられる冷却材と接触しており、真空エリ

アやブランケットエリアの物質バウンダリと比べると、内部に保持されているR I インベントリは無視しても良い量であると考えられる。従って、V CやB Cは、他エリア側面では難移動性R Iとしてのトリチウムインベントリの存在を考えているが、冷却材側では考えないことにする。

#### e. 廃棄物エリア内システム構成要素のR Iソースの分布

廃棄物エリア内の易動性R Iは、燃料エリア空間から廃棄物エリア空間に移送されてきた不純物を多く含む混合物の中に存在している。このようなR Iの状態はエリア内のトリチウム気体密度と気相温度で特定できる。

また、廃棄物エリア空間の状態（温度、圧力、R I濃度、他エリアからの透過漏洩等）や物質バウンダリW Oの状態を真空エリアや燃料エリアと比べると、W O内に蓄積され異常時に移動化するR I インベントリは少ないと考え、W Oの廃棄物エリア側面でのR I インベントリを無視する。

廃棄物エリアの中の廃棄物としては、気体廃棄物を貯蔵する金属水素化物、保守時に交換されたプラズマ対向材等の固体の廃棄物、液体廃棄物の固化体等が考えられる。故に、これらを包括的に廃棄物貯蔵機能内部の廃棄物貯蔵物質に存在する難移動性R Iとして考える。このR Iは、貯蔵物質やエリア空間の状態によって移動化する可能性がある。

## 2.3 システムモデル内のエネルギーソースの分布

### 2.3.1 エネルギーソースの種類

核融合炉システムでは多種類のエネルギーソースがシステム内の各部で使用されているが、これらのエネルギーソースは異常時において、異常なエネルギー解放からソースタームとリークパスの形成に影響を与える可能性がある。従って、安全解析においては、システム内におけるエネルギーインベントリとその解放挙動について把握しておく必要がある。

本研究では、これらのエネルギーソースを以下の5種類に分類する。つまり、システム内のエネルギーソースとして、電磁エネルギー、化学エネルギー、機械エネルギー、熱エネルギー、放射エネルギーソースが存在すると考える。

### 2.3.2 エネルギーソースの分布とシステムモデルへの配置

システムモデル内のエネルギーソースの分布を Table 2-3と Fig.2-6に示す。図の中では、電磁エネルギー、化学エネルギー、機械エネルギー、熱エネルギー、放射エネルギーソースをそれぞれ以下のように表示する。

EME 電磁エネルギー (ElectroMagnetic Energy)
 RAE 放射エネルギー (Radiational Energy)



Table 2-3 Energy Sources on System model of General Fusion Reactor

エリア	電磁エネルギーソース	放射エネルギーソース	熱エネルギーソース	機械エネルギーソース	化学エネルギーソース
真空エリア (AV)	プラズマ電流 (プラズマ) 高周波 → 加熱入力 (プラズマ加熱機能)	D T 反応中性子 (プラズマ) 中性粒子ビーム → 加熱入力 (プラズマ加熱機能)	α 粒子 (プラズマ) 崩壊熱 (VO, VB, VC) 加熱入力 (プラズマ加熱機能)	冷凍材 (真空排気機能) 回転機器 (真空排気機能)	水素 (プラズマ、空間) 構造材 (VB, VC, VO)
燃料エリア (AF)	—	—	燃料貯蔵物質 (燃料貯蔵機能) パーズガス (燃料輸送機能)	冷凍材 (燃料精製分離機能 、燃料供給機能) 回転機器 (燃料輸送機能 、 廃棄物処理機能)	水素 (空間) 化学反応性物質 (燃料精製分離機能) 燃料貯蔵物質 (燃料貯蔵機能)
廃棄物エリア (AW)	—	—	崩壊熱 (廃棄物貯蔵物質) 廃棄物貯蔵物質 (廃棄物貯蔵機能)	—	水素 (空間) 廃棄物貯蔵物質 (廃棄物貯蔵機能)
ブランケット エリア (AB)	—	中性子 (中性子増倍材)	増殖材、中性子増倍材 崩壊熱 (VB, BC)	—	水素 (空間) 増殖材、中性子増倍材
冷却材エリア (AC)	—	—	冷却材 (熱交換機能) 崩壊熱 (VC, BC)	冷却材 (空間) 回転機器 (冷却材循環機能)	冷却材 (空間)
格納エリア (AO)	コイル電流 (磁場形成機能)	—	—	冷凍材 (磁場形成機能)	大気 (=酸素) (空間)

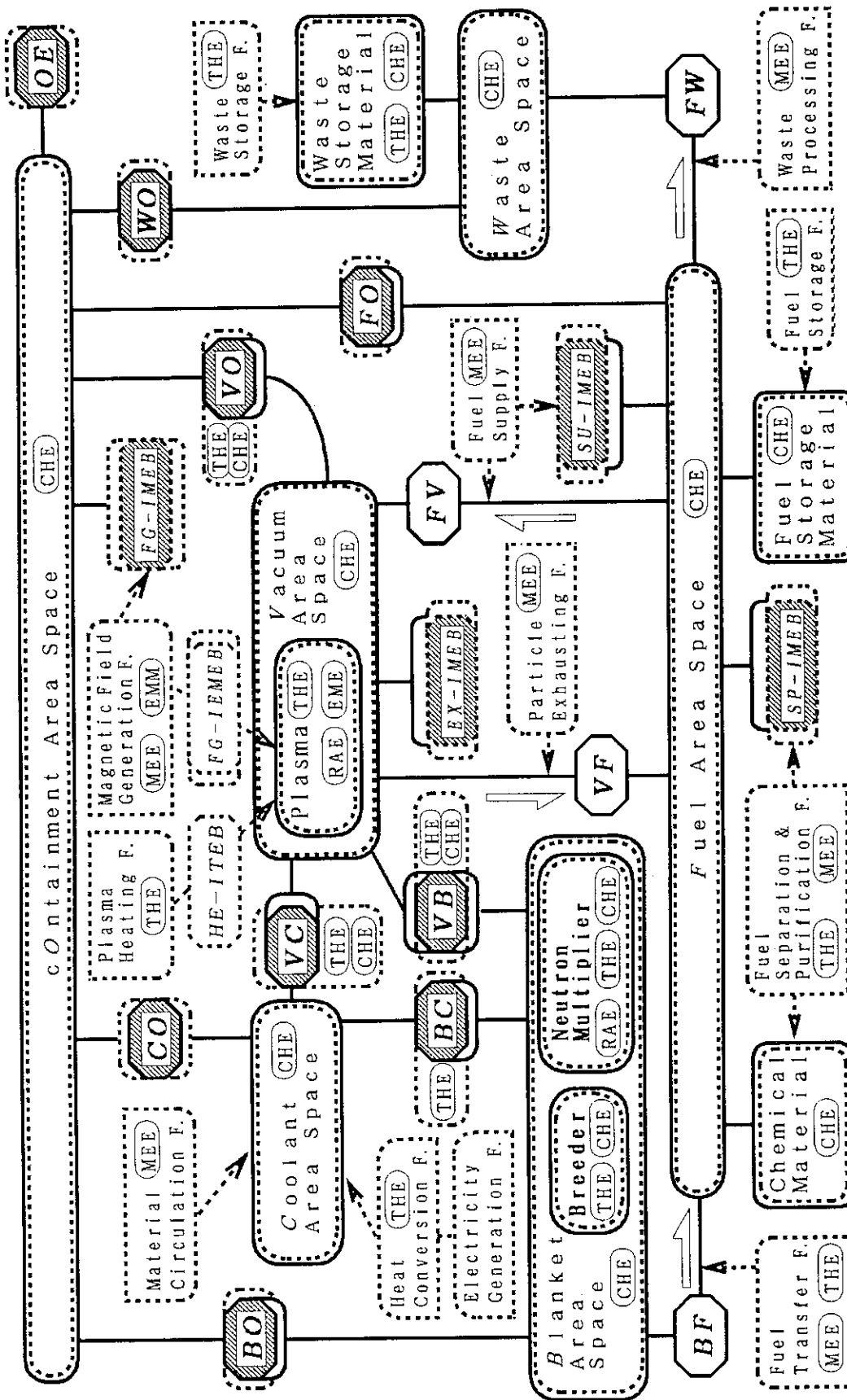


Fig. 2-6 Energy Source Distribution in the System model

(THE) 熱エネルギー  
(Thermal Energy)

(MEE) 機械エネルギー  
(Mechanical Energy)

(CHE) 化学エネルギー  
(Chemical Energy)

各エネルギーソースのシステム内における分布について以下に述べる。

#### a. 電磁エネルギー

電磁エネルギーソースは磁場形成機能にあり、FG-IEMEB（電磁エネルギーバウンダリ）を経て、電磁場を形成する。また、プラズマもプラズマ電流によって周辺に電磁場を形成する。従って、電磁エネルギーソースを内包するシステム構成要素を磁場形成機能とプラズマと考える。

このような電磁エネルギーの異常解放によって、磁場が変動し、周辺電導構造材での渦電流の発生から、磁場-渦電流回路間の相互作用による電磁力が構造材に働くことが考えられる。また、渦電流によるジュール熱によって構造材に熱が発生する場合も考えられる。

これらの現象は構造材の破損（=物質バウンダリの破損）や構造材中のRIの移動化につながる可能性があり、安全上の考慮が必要なエネルギーソースである。

#### b. 放射エネルギー

放射エネルギーソースは、核融合炉から放出される中性子、 $\gamma$ 線、x線が考えられる。そこで、放射エネルギーを内包するシステム構成要素をプラズマと中性子増倍材とする。これらの放射エネルギー解放は、プラズマ中の核融合（DT）反応に影響を受ける。

放射エネルギーの解放による影響としては、構造材の温度上昇や照射損傷などがあり、特に異常なエネルギー解放が起こると、物質バウンダリの破損やRIの移動化を招く可能性がある。

#### c. 熱エネルギー

イオン、電子、中性粒子ビーム、崩壊熱などが主な熱エネルギーソースである。熱エネルギーソースは、プラズマ、プラズマ加熱機能、放射化されている物質バウンダリ（VO、VC、VB、BC）、増殖材、中性子増倍材、そして温度制御を行う制御機能（熱除去機能、燃料輸送機能、燃料精製・分離機能、燃料貯蔵機能、廃棄物貯蔵機能など）に存在している。これらの熱エネルギーの異常解放による影響としては、構成要素の温度上昇などの状態異常があり、物質バウンダリの破損やRIの移動化を招く可能性がある。

#### d. 機械エネルギー

高圧機器、循環機器、冷凍材や冷却材などが主な機械エネルギーソースである。機械エネルギーソースは、磁場形成機能、燃料供給機能、冷却材循環機能、粒子排気機能、燃料

輸送機能、燃料精製・分離機能、廃棄物処理機能に存在している。

機械エネルギーの異常解放による影響には、(1) エリア内への気液相物質の流入や冷却材・冷凍材の気化による圧力の上昇、(2) タービン発電機、冷凍材等によるミサイルの発生などがあり、物質バウンダリの破損を招く可能性がある。

#### e. 化学エネルギー

化学エネルギーソースとしては、エリア空間内の気体（トリチウムを含む水素同位体など）、増殖材、冷却材、燃料エリア中の化学反応性物質、その他バウンダリ材等の可燃性物質等が考えられる。これらは設計時の材料選択に依存し、通常運転時あるいは異常時に共存するおそれのある物質間の化学反応を起こす可能性と反応条件等に留意しておく必要がある。

例えば、ITER設計ではプラズマ対向材（カーボン、タンゲステン、ベリリウム）と空気（=酸素）や冷却水蒸気との化学反応、水素ガスと空気（=酸素）との化学反応などが安全上考慮すべき化学反応として挙げられている。また、増殖材設計で、 $\text{Li}_2\text{O}$  固体増殖材や液体増殖材（ $\text{Li}$ 、 $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ 、 $\text{Li}_7\text{Pb}_2$ 、 $\text{LiAl}$ ）を使用した場合には、空気や水との反応可能性があり、安全上の考慮が必要である。更にトリチウムの貯蔵に用いる金属（水素化物法）で、ウラン、チタン、ジルコニウムなどの粉末は常温の空气中で燃焼するので、金属周りの雰囲気管理が安全上必要となる〔9〕〔11〕〔12〕。

化学エネルギーの解放による影響としては、(1) 化学反応による圧力・温度の上昇、(2) 爆発によるミサイルや圧力波の形成、(3) 火災などがあり、物質バウンダリの破損やRIの移動化を招く可能性がある。

### 3. システムモデル内のエネルギー・物質フロー

Fig. 2-1, 2-5, 2-6 において、それぞれシステム構成要素の空間配置、R I ソースの分布、エネルギーソースの分布についてまとめたシステムモデルを図示した。これらの全体図では、システム内の複雑なエネルギー・物質フローを書き入れることはしなかった。しかしながら、数学モデルの作成のためには、安全解析上重要な核融合システム内に形成されているエネルギー・物質（含 R I）フローをシステムモデル上で明確にする必要がある。

そこで、各エリアごとのシステムモデルに、通常運転時あるいは異常時に形成されるエネルギー・物質（含 R I）フローを書き入れていくことにする。

真空エリアから格納エリアまで6エリアについて、3.1～3.6でフローの抽出、エリアごとの異常事象の抽出とこれに関連するフローをまとめる。

#### 3.1 真空エリアに関連するエネルギー・物質フロー

##### 3.1.1 真空エリアに属するシステム構成要素

真空エリアはプラズマによる核融合反応エネルギー生成・維持のためのエリアであり、属するシステム構成要素として、以下のものを考える。

- |                 |                                     |
|-----------------|-------------------------------------|
| (1) プラズマ        | (2) 真空エリア空間                         |
| (3) V O 物質バウンダリ | (4) V C 物質バウンダリ                     |
| (5) V B 物質バウンダリ | (6) F V ・ V F 物質バウンダリ               |
| (7) 磁場形成機能 ………  | a) 機能制御部                            |
|                 | b) F G - I M E B (内部機械エネルギーバウンダリ)   |
|                 | c) F G - I E M E B (内部電磁エネルギーバウンダリ) |
| (8) プラズマ加熱機能 …  | a) 機能制御部                            |
|                 | b) H E - I T E B (内部熱エネルギーバウンダリ)    |
| (9) 燃料供給機能 ………  | a) 機能制御部                            |
|                 | b) S U - I M E B (内部機械エネルギーバウンダリ)   |
| (10) 粒子排気機能 ……… | a) 機能制御部                            |
|                 | b) E X - I M E B (内部機械エネルギーバウンダリ)   |

真空エリアはブランケットエリア、冷却材エリア、燃料エリア、格納エリアと隣接しており、それぞれのエリアとの境界として5つの物質バウンダリ（V B、V C、F V、V F、V O）を設定する。この中で、燃料エリアとの間には通常運転時に物質フロー（燃料供給と灰排気）が形成されており、それぞれ燃料供給機能と粒子排気機能によって流れる物質

と量が制御されている。つまり、バウンダリFV、VFは通常運転時にも制御された物質フローが形成されている物質バウンダリである。

これらのシステム構成要素の空間配置とRIソース、エネルギーソースの分布をまとめると、Fig. 3-1Aのようになる。これによると、異常の進展において、真空エリア内の「守るべき」アイテムである「RI制御性」は、物質バウンダリ（VO、VB、VC）や粒子排気機能内部機械エネルギーバウンダリ（EX-IMEB）の状態異常により損なわれる可能性がある（RIの移動化）。また、「バウンダリ健全性」についても、物質バウンダリやバウンダリによって隣合うエリア空間の状態異常により損なわれる可能性がある（物質バウンダリ破損）。

さらに、プラズマやEX-IMEB、SU-IMEBなどは、状態異常による破損によって新たな異常エネルギーフローを形成する可能性がある（エネルギーの異常解放）。

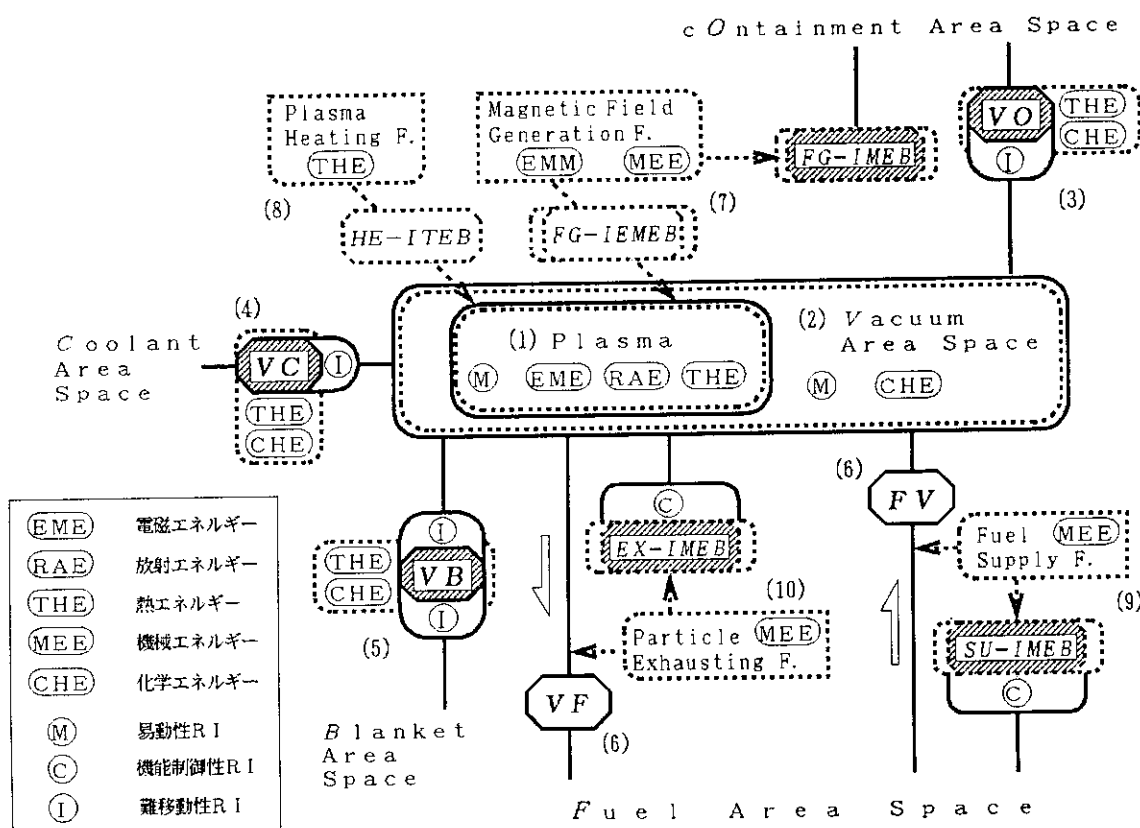


Fig. 3-1A System Elements related to Vacuum Area

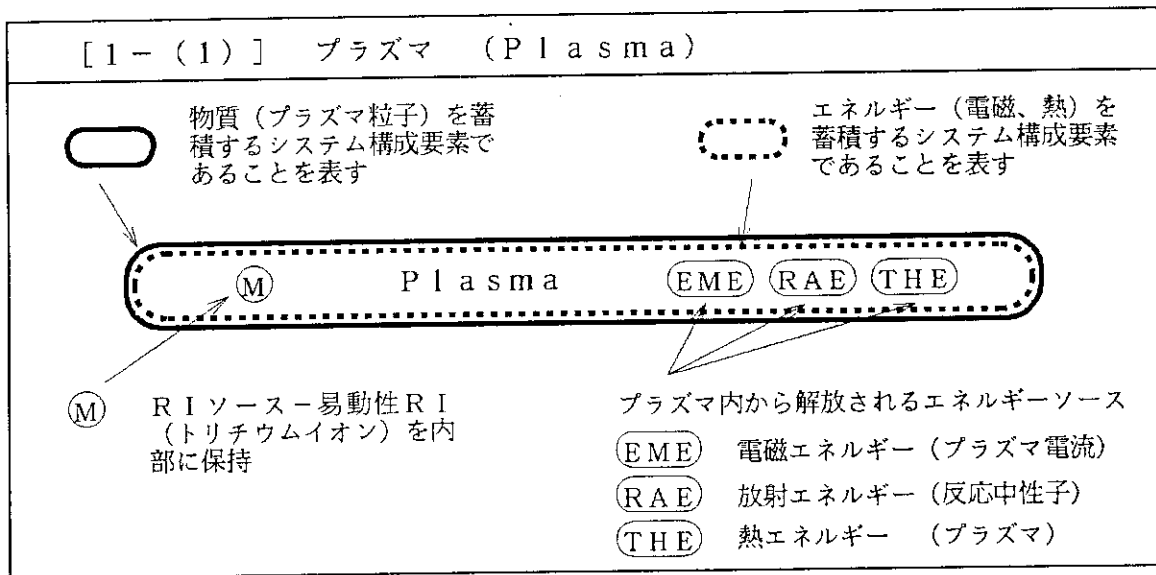
RIの移動化、物質バウンダリ破損、エネルギーの異常解放を引き起こすシステム構成要素の状態異常は、それらのシステム構成要素に関連のあるエネルギー・物質フローに異常が起こった場合である。

そこで、上記の各システム構成要素について、それぞれ関連のあるエネルギー・物質フローを以下にまとめる。

1-(1) プラズマ

プラズマは、核融合反応エネルギー生成維持のための作用物質である。内部には易動性 R I (トリチウムイオン) が保持され、また、電磁エネルギー・放射エネルギー・熱エネルギーソースがプラズマから他のシステム構成要素に解放される。そして、プラズマは物質 (含 R I) と電磁エネルギー、熱エネルギーを蓄積しており、これらの蓄積量の変化は、プラズマ内イオン密度やプラズマ (イオン、電子) 温度、プラズマ電流といった状態変数の変化によって判る (Table 3.1-(1) 参照)。

Table 3.1-(1) Symbols of Plasma in the system model



そして、プラズマ内の物質・エネルギーの蓄積量の異常、つまり状態異常によって、異常な物質・エネルギーが他のシステム構成要素に解放される可能性がある。従って、プラズマに関連のある物質 (含 R I)、電磁エネルギー、放射エネルギー、熱エネルギーフローを明確にする必要がある。

そこで、これらのプラズマと他のシステム構成要素との間の通常・異常時のフローを以下にまとめた (Fig. 3.1-(1))。

電磁エネルギーフローは、通常時に磁場形成機能のコイル回路-プラズマ間において形成されている (EM1)。しかし、磁場変動時あるいはプラズマディスラプション時には、これ以外に物質バウンダリ (BC、VO、VC、VB)、磁場形成機能・粒子排気機能・燃料供給機能それぞれの内部機械エネルギーバウンダリに異常な電磁エネルギーフローが形成され、これらの構成要素に渦電流が誘起される (EM2~EM8)。さらに、この渦電流が電磁力あるいはジュール熱という形態で機械エネルギー、熱エネルギーに変換されて、バウンダリ破損などの新たな異常を招く可能性がある。

放射エネルギーフローとしては、プラズマ内の核融合反応によって生成された中性子の増殖材、中性子増倍材、BCバウンダリと真空バウンダリ (VO、VC、VB) への流入

(RD1~RD6)が主要なものであると考える。プラズマディスラプション開始後からは核融合反応がなくなり、このフローも消滅する。

熱エネルギーフローとしては、プラズマ加熱機能からの加熱入力 (TH1)、真空バウンダリ (VO、VC、VB) へのエネルギー損失によるフロー (TH2~TH4) が形成されている。

物質フローとしては、真空エリア空間との相互拡散 (M1) と流出プラズマ粒子の物質バウンダリへの入射 (M2~M4) を考える。これらの持つエネルギーは無視できる (M1) か他のエネルギーフロー (TH2~TH4) に算入されている (M2~M4)。

エネルギーを伴う物質フローとしては、燃料供給機能による供給燃料のフローを考える (En1)。このフローのエネルギーレベルは、供給方式の選択によって変わってくる。

プラズマは、状態 (プラズマ温度、密度) 異常がある段階以上に達する、あるいは、真空バウンダリ (VO、VC、VB、VF、FV) の健全性が損なわれた場合にプラズマディスラプションからプラズマ消滅に到る。プラズマディスラプション時には、数 msec オーダーでプラズマ内部の全蓄積物質、全蓄積熱エネルギーと全蓄積電磁エネルギーが解放されることになる (M1~M4、TH2~4、EM1~7)。プラズマ消滅後の事象進展では当然、上記の各フローを考慮する必要はなくなる。

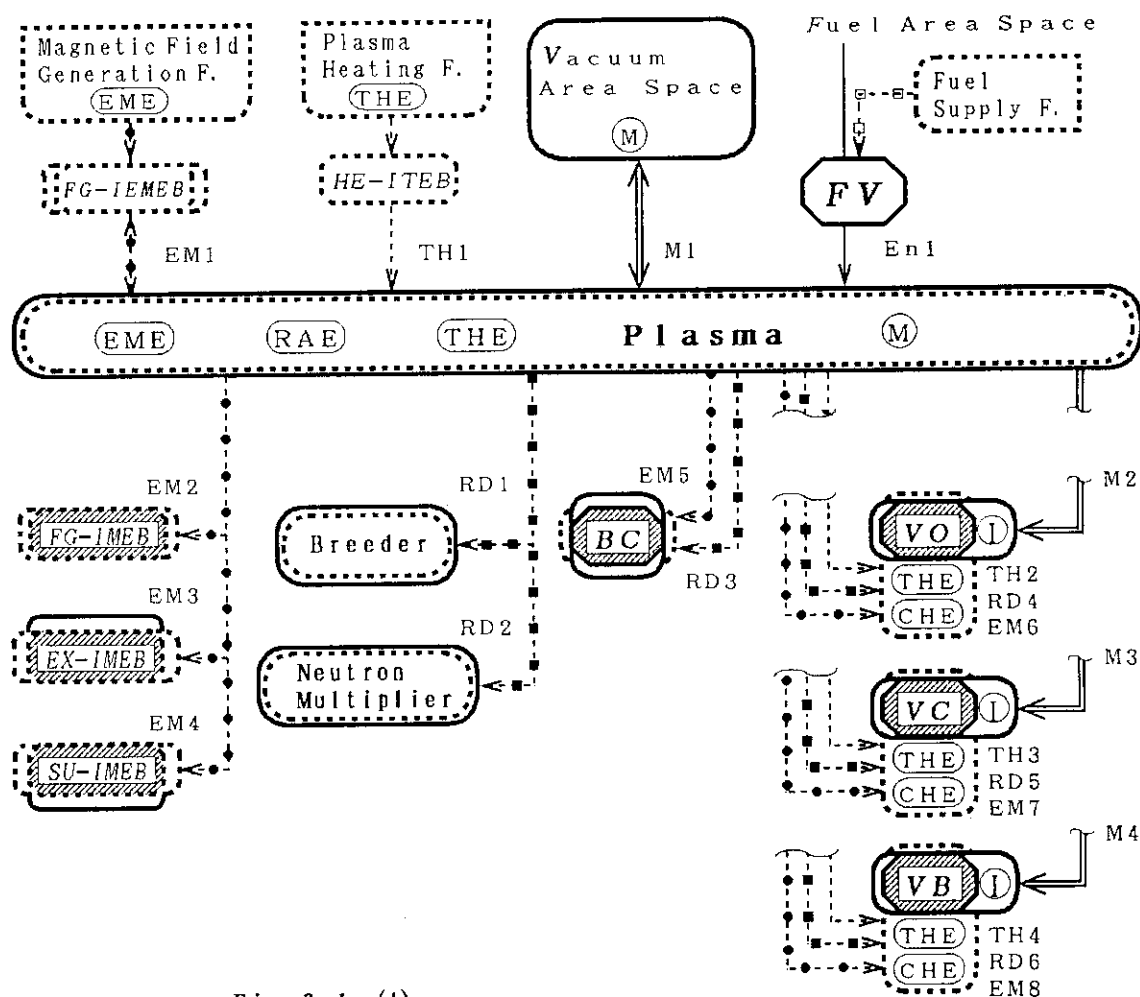


Fig. 3. 1-(1)  
Mass and Energy Flows related to Plasma



<i>Legend</i>	
●-●-●➤ 電磁エネルギーフロー (EM)	○-○-○➤ 化学エネルギーフロー (CH)
■-■-■➤ 放射エネルギーフロー (RD)	—➤ 物質フローに伴うエネルギーフロー (E <sub>n</sub> ) (エンタルピー変化量を表す)
-----➤ 熱エネルギーフロー (TH)	====➤ 物質フロー (M) (エンタルピー変化を無視)
⊖-⊖-⊖➤ 機械エネルギーフロー (ME)	

システム構成要素に関連のあるフローを表した図では以後、フローの種類をそれぞれ上表のように表示する。そして、それぞれのフローを各フロー種類を表す添字 (EM、RD、TH、ME、CH、M、E<sub>n</sub>) + 番号によって特定している。

プラズマに関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下のようなになる。

#### ・電磁エネルギーフロー

- EM1 FG-IEMEBとの間の相互電磁誘導によるフロー
- EM2 プラズマ異常による磁場変動で形成されるFG-IMEBへのフロー
- EM3 プラズマ異常による磁場変動で形成されるEX-IMEBへのフロー
- EM4 プラズマ異常による磁場変動で形成されるSU-IMEBへのフロー
- EM5 プラズマ異常による磁場変動で形成されるBCへのフロー
- EM6 プラズマ異常による磁場変動で形成されるVOへのフロー
- EM7 プラズマ異常による磁場変動で形成されるVCへのフロー
- EM8 プラズマ異常による磁場変動で形成されるVBへのフロー

#### ・放射エネルギーフロー

- RD1 増殖材へのDT反応生成中性子入射によるフロー
- RD2 中性子増倍材へのDT反応生成中性子入射によるフロー
- RD3 BCへのDT反応生成中性子入射によるフロー
- RD4 VOへのDT反応生成中性子入射によるフロー
- RD5 VCへのDT反応生成中性子入射によるフロー
- RD6 VBへのDT反応生成中性子入射によるフロー

#### ・熱エネルギーフロー

- TH1 プラズマ加熱機能による加熱入力のプラズマへの流入分によるフロー
- TH2 プラズマ損失エネルギーのVOへの流出によるフロー
- TH3 プラズマ損失エネルギーのVCへの流出によるフロー
- TH4 プラズマ損失エネルギーのVBへの流出によるフロー

・物質フロー

- M1 真空エリア空間との間の相互粒子拡散によるフロー
- M2 VOへ入射するプラズマ拡散粒子により形成されるフロー
- M3 VCへ入射するプラズマ拡散粒子により形成されるフロー
- M4 VBへ入射するプラズマ拡散粒子により形成されるフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

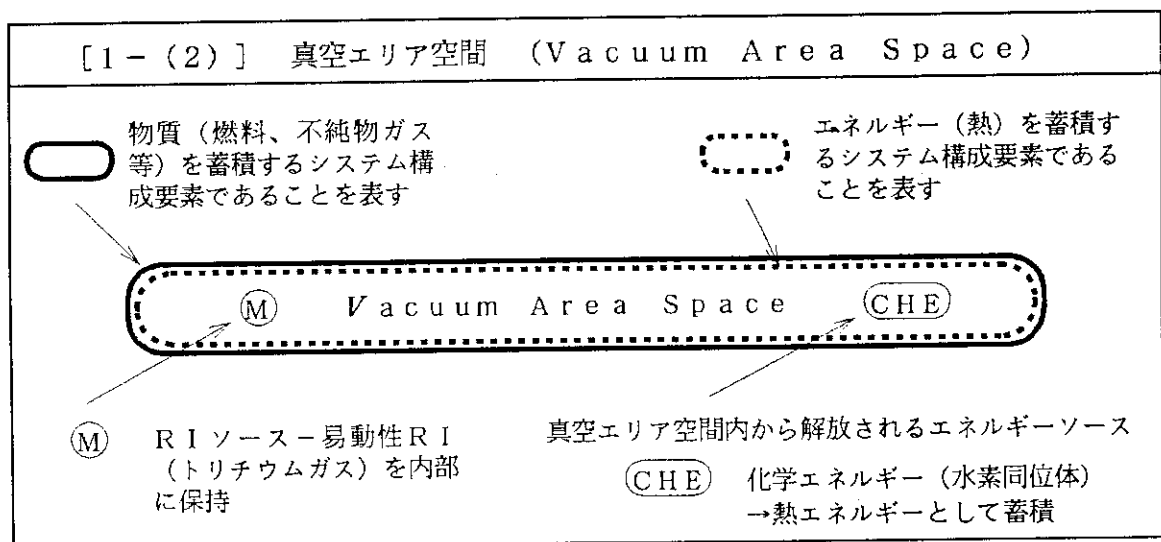
- En1 燃料供給機能の制御による供給燃料のフロー（燃料供給機能作動時）

1-(2) 真空エリア空間

プラズマ点火時のプラズマ境界と真空バウンダリ（VO、VC、VB、FV、VF）との間の空間、あるいはプラズマ消滅時の真空バウンダリによって閉じられている空間となるシステム構成要素が真空エリア空間である。

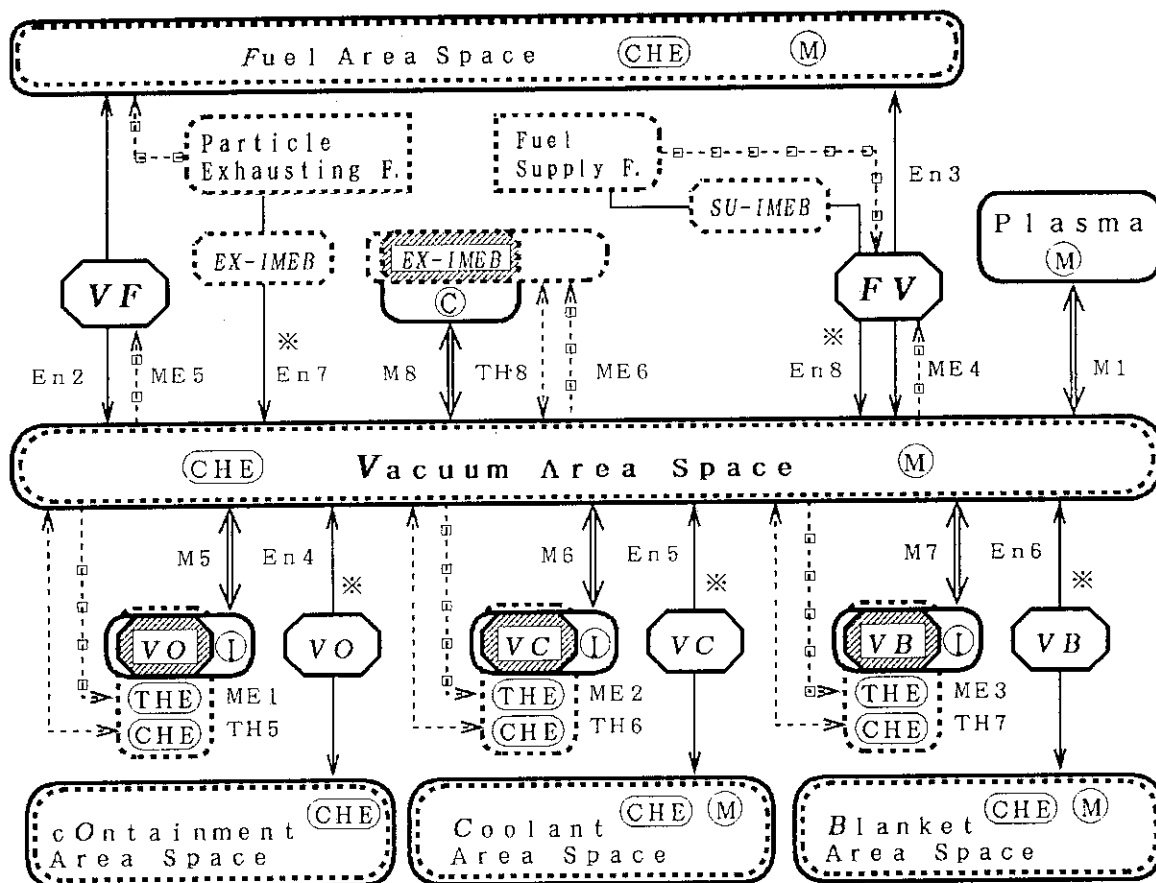
この空間は内部に易動性RI（トリチウムガス）を保持しており、物質バウンダリの破損による空気の流入が起こると、内部に含まれている水素同位体が条件によっては燃焼反応を起こし、化学エネルギーソースが解放されることになる。また、この空間は熱エネルギーを蓄積するシステム構成要素であり、蓄積量によっては温度あるいは圧力上昇による真空バウンダリ破損を招く可能性がある（Table 3.1-(2) 参照）。そこで、事象の進展に影響を与える真空エリア空間の状態変化を解析するために、真空エリア空間に関連のある物質（含RI）フローと熱エネルギーフローを明確にする必要がある。

Table 3.1-(2) Symbols of Vacuum Area Space in the system model



真空エリア空間と他のシステム構成要素との間の通常・異常時のフローを以下にまとめた（Fig. 3.1-(2) 参照）。図の中には、バウンダリ破損が起こった場合のフローを特に※

印をつけて表示している。



※ … 破損時にのみ形成

Fig. 3. 1-(2) Mass and Energy Flows related to Vacuum Area Space

熱エネルギーフローは、物質バウンダリ (VO、VC、VB) との間の熱伝達によるもの (TH5~TH7) と粒子排気機能内部機械エネルギーバウンダリ (EX-IMEB) との熱伝達によるもの (TH8) がある。これらのフローは、バウンダリ破損が起こっても形成され定ると考える。

内部の化学エネルギーソース (水素同位体) は、熱エネルギーに変換されて、そのままエリア空間自身に蓄積される。

物質フローは、プラズマ、物質バウンダリ (VO、VC、VB)、粒子排気機能内部機械エネルギーバウンダリ (EX-IMEB) との間に形成されている (M1, M5~M8)。これらのフローの方向は、真空エリアとそれぞれのシステム構成要素の状態によって決まる。

エネルギーを伴う物質フローは、通常時は粒子排気機能による排気フローのみを考える (En2)。しかし、真空バウンダリ (VF、FV、VO、VC、VB) の破損が起こった場合には、破損した物質バウンダリによって隣接しているエリア空間 (格納エリア空間、冷却材エリア空間、ブランケットエリア空間、燃料エリア空間) との間にエネルギーを伴う

物質フローが形成される(En2, En3~En6)。このフローの方向や流量は、両エリア空間の圧力差や物質の濃度差等によって決まる。更に、燃料供給機能、粒子排気機能内部機械エネルギーバウンダリ(SU-IMEB、EX-IMEB)の破損によって、真空、燃料エリアにエネルギーを伴う物質フローが形成される(En7, En8)。

破損前の各バウンダリは、エリア空間の圧力負荷を受けている。そこで、これらの負荷を機械エネルギーフローの形成と考える(ME1~ME6)。

このように、真空エリア空間は、プラズマ、物質バウンダリ、機能内部エネルギーバウンダリの健全性の有無によって、形成されるフローが変化する。

真空エリア空間に関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下のようになる。

#### ・熱エネルギーフロー

- TH5 真空エリア空間とVOとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH6 真空エリア空間とVCとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH7 真空エリア空間とVBとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH8 真空エリア空間とEX-IMEBとの間に形成される熱伝達によるフロー

#### ・機械エネルギーフロー

- ME1 真空エリア空間のVOへの圧力負荷を表すフロー
- ME2 真空エリア空間のVCへの圧力負荷を表すフロー
- ME3 真空エリア空間のVBへの圧力負荷を表すフロー
- ME4 真空エリア空間のFVへの圧力負荷を表すフロー
- ME5 真空エリア空間のVFへの圧力負荷を表すフロー
- ME6 真空エリア空間のEX-IMEBへの圧力負荷を表すフロー

#### ・物質フロー

- M1 プラズマとの間の相互粒子拡散によるフロー
- M5 VOとの間の吸収/脱離あるいは蒸発現象によるフロー
- M6 VCとの間の吸収/脱離あるいは蒸発現象によるフロー
- M7 VBとの間の吸収/脱離あるいは蒸発現象によるフロー
- M8 EX-IMEBとの間の吸着/脱離現象によるフロー

#### ・エネルギーを伴う物質フロー

- En2 粒子排気機能の制御による排気粒子のフロー、あるいはVF破損時の燃料エリア空間-真空エリア空間間の物質移動によるフロー
- En3 FV破損時の燃料エリア空間-真空エリア空間間の物質移動によるフロー
- En4 VO破損時の格納エリア空間-真空エリア空間間の物質移動によるフロー

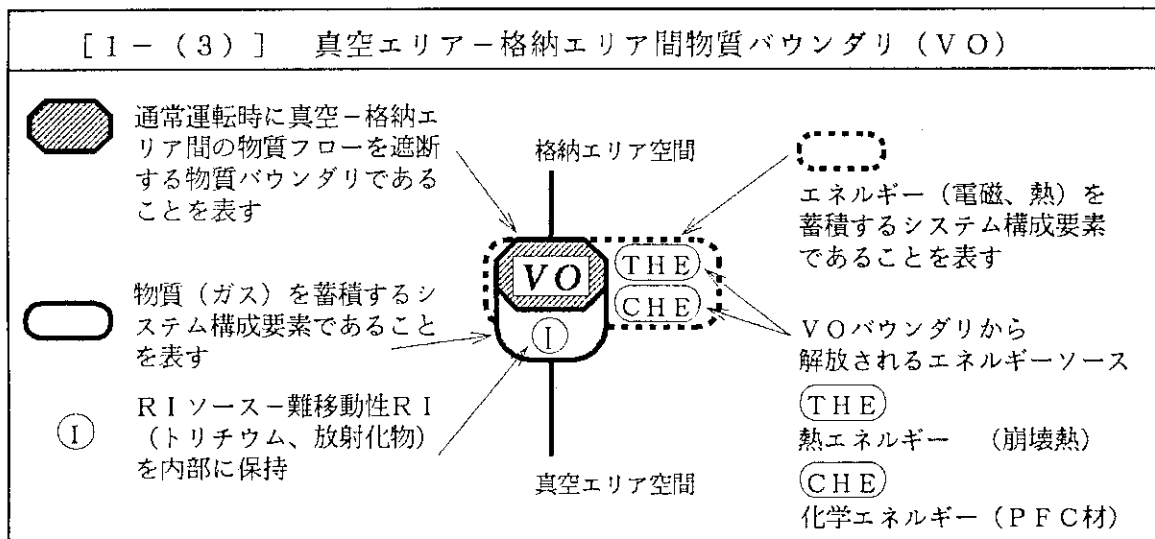
- En5 VC破損時の冷却材エリア空間-真空エリア空間間の物質移動によるフロー
- En6 VB破損時のブランケット-真空エリア空間間の物質移動によるフロー
- En7 EX-IMEB破損時に放出される物質の真空エリア空間流入分によるフロー
- En8 SU-IMEB破損時に放出される物質の真空エリア空間流入分によるフロー

1-(3) VOバウンダリ (真空-格納エリア間物質バウンダリ)

VOバウンダリは格納エリア空間と真空エリア空間との間の物質境界であり、通常時には両空間の物質フローを遮断している。VOは、真空エリア側面に難移動性RI (吸蔵トリチウム、放射化物等) を保持している。特に、黒鉛系の材料を真空エリア側面に使用する場合には、トリチウムのトラップ量が大きく、さらにスパッタされた粒子が水素同位体を取り込んでプラズマ対向材に再付着する共着(co-deposition) 現象で取り込まれるトリチウムも無視できない。例えば、ITER-CDAのプラズマ対向機器(PFC)材料であるグラファイトのトリチウム共着率は50~100 kg/burn yearといわれている[13]。

また、エネルギーに関しては、熱エネルギー、電磁エネルギーを蓄積するシステム構成要素であると考えられる。更に、熱エネルギー(崩壊熱)と化学エネルギー(PFC材)ソースを内包しており、これらのエネルギーソースはバウンダリあるいは真空エリア空間に解放されて、熱エネルギーとして蓄積される。化学エネルギーの解放は、真空エリア空間内に流入した空気や冷却材との接触によって発生する可能性がある。電磁エネルギーと熱エネルギーの蓄積変化は、VOに流れる渦電流と温度の状態変数の変化であり、これによって異常時のVOの挙動が解析できる(Table 3.1-(3)参照)。

Table 3.1-(3) Symbols of VO Boundary in the system model



このバウンダリの状態異常によっては、難移動性RIの移動化(=RI制御性の喪失)あるいはVOバウンダリ破損(=バウンダリ健全性の喪失)が起こる。従って、VOバウ

ンダリの状態変化に影響するエネルギー・物質（含R I）フローについて以下に述べることにする（Fig. 3.1-(3) 参照）。

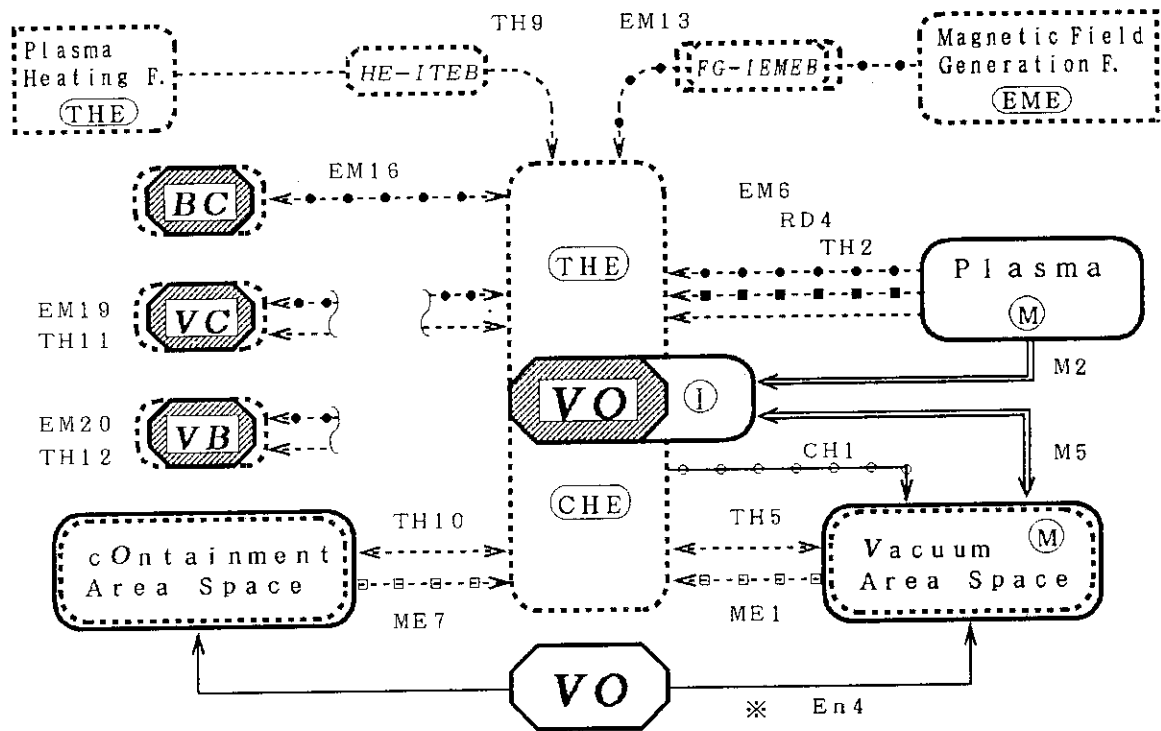


Fig. 3.1-(3) Mass and Energy Flows related to VO Boundary

電磁エネルギーフローは、磁場変動時あるいはプラズマディスラプション時にプラズマ、磁場形成機能電磁エネルギーバウンダリとの間に形成され(EM6, 13)、渦電流が誘起される。また、このとき同時にBC、VC、VBにも渦電流が誘起されており、これらの物質バウンダリとは相互誘導結合関係により電磁エネルギーフローが形成される(EM16, 19, 20)。

プラズマ点火時には、プラズマからのDT反応生成中性子の入射があり、放射エネルギーフローが形成され、内部に熱エネルギーとして蓄積される(RD4)。

熱エネルギーフローとしては、条件付きのフローとして、プラズマ点火時とプラズマディスラプション時におけるプラズマ損失エネルギーの一部の流入によるフロー(TH2)、プラズマ加熱機能作動時の加熱入力の一部の流入によるフロー(TH9)が考えられる。そして、常に形成されている熱エネルギーフローとして、エリア空間(真空、格納)との間の熱伝達によるもの(TH5, 10)、他の真空バウンダリ(VC、VB)との間の熱伝導あるいは熱輻射によるものが考えられる(TH11, 12)。

機械エネルギーフローは、VOバウンダリ健全時に、エリア空間(真空、格納)の圧力負荷によるものを考える(ME1, 7)。

内部の化学エネルギーソース(PFC材)は、反応によるエネルギー解放により、そのまま内部で熱エネルギーに変換されて蓄積されるか、真空エリア空間内に反応生成物を伴

って化学エネルギーフローが形成される(CH1)。

物質フローとしては、プラズマ点火時にプラズマからVOに入射するもの(M2)と真空エリア空間との間の吸収/脱離あるいは蒸発現象によるものが考えられる(M5)。

エネルギーを伴う物質フローとしては、VOバウンダリ破損時にVOバウンダリを通じて真空エリア空間と格納エリア空間との間の物質移動によるフローがVOに関連するフローとして考えられる(En4)。

VOバウンダリが保持している難移動性RIは、バウンダリの状態異常(温度)と真空エリア空間の状態異常(温度、圧力)に起因するトリチウムの脱離やPFC材の蒸発が起きて移動化する(M5)。

また、VOバウンダリは、バウンダリの状態異常に起因した熱的な影響(温度上昇)や機械的な影響(電磁応力・熱応力・真空エリア空間圧力・格納エリア空間圧力等による応力増大)が限界を越えた場合にバウンダリ破損を起こし、リークパスを形成する(En4)。

このようにVOバウンダリは事象シーケンス上で、他のシステム構成要素とのフローの変化により、RIの移動化やVOバウンダリ破損を起こして、さらにフローを変化させる。

これらのVOバウンダリに関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下のようなになる。

#### ・電磁エネルギーフロー

- EM6 プラズマ異常による磁場変動で形成されるVOへのフロー
- EM13 磁場形成機能異常による磁場変動で形成されるVOへのフロー
- EM16 VO-BC間の相互電磁誘導現象によるフロー
- EM19 VO-VC間の相互電磁誘導現象によるフロー
- EM20 VO-VB間の相互電磁誘導現象によるフロー

#### ・放射エネルギーフロー

- RD4 VOへのDT反応生成中性子入射によるフロー

#### ・熱エネルギーフロー

- TH2 VOへのプラズマ損失エネルギーの流入によるフロー
- TH5 VOと真空エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー
- TH9 プラズマ加熱機能による加熱入力のVOへの流入分によるフロー
- TH10 VOと格納エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー
- TH11 VOとVCとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー
- TH12 VOとVBとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー

#### ・機械エネルギーフロー

- ME1 VOへの真空エリア空間の圧力負荷を表すフロー

ME7 VOへの格納エリア空間の圧力負荷を表すフロー

・化学エネルギーフロー

CH1 VOの化学反応により真空エリア空間に流出するフロー

・物質フロー

M2 VOへ入射するプラズマ拡散粒子により形成されるフロー

M5 真空エリア空間との間の吸収/脱離あるいは蒸発現象によるフロー

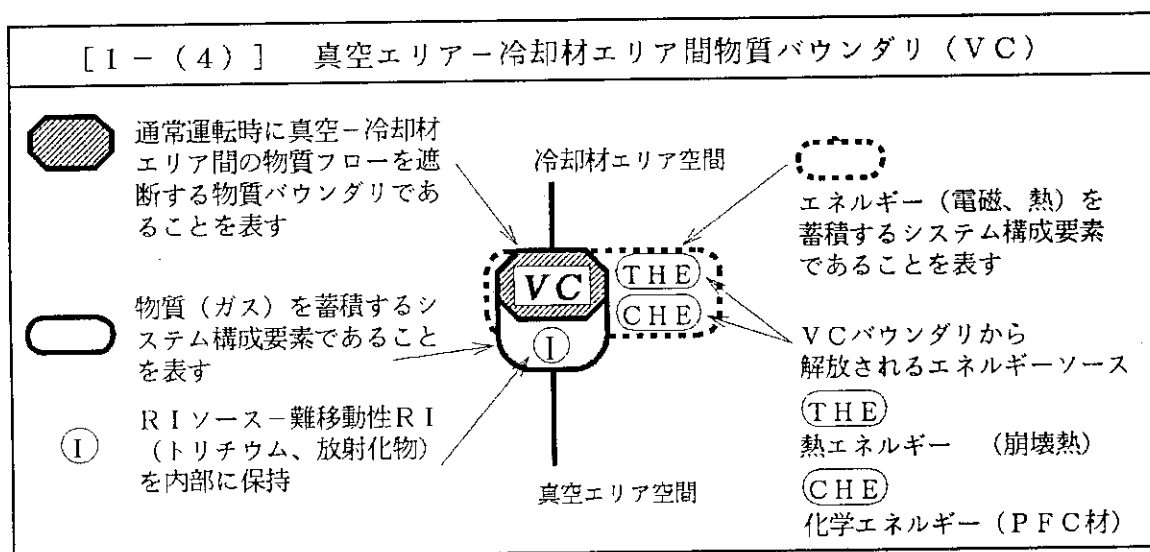
・エネルギーを伴う物質フロー

En4 VO破損時の格納エリア空間-真空エリア空間間の物質移動によるフロー

1-(4) VCバウンダリ (真空-冷却材エリア間物質バウンダリ)

真空エリア空間と冷却材エリア空間の間には物質境界VCが存在し、通常時には両空間の物質フローを遮断している。VCは、真空エリア側面に難移動性RI (吸蔵トリチウム、放射化物等) を保持している。また、エネルギーに関しては、熱エネルギー、電磁エネルギーを蓄積するシステム構成要素であると考えられる。更に、熱エネルギー (崩壊熱)、化学エネルギー (PFC材) ソースを内包しており、ともにバウンダリ内に解放されて蓄積される。化学エネルギーの解放は、真空エリア空間内に流入した空気や冷却材との接触によって発生する可能性がある。エネルギーの蓄積変化は、VCに流れる渦電流と温度の状態変化であり、これによってVCのシステム挙動が解析できる (Table 3.1-(4) 参照)。

Table 3.1-(4) Symbols of VC Boundary in the system model



この物質バウンダリは前述のVOと同じく、バウンダリの状態異常によっては難移動性RIの移動化 (= RI制御性の喪失) あるいはVCバウンダリ破損 (=バウンダリ健全性



の喪失) が起こる。但し、VCバウンダリの破損は直接的にはリークパスを形成しないが、新たなRIの移動化あるいはバウンダリ破損を誘発する可能性がある。

このような守るべきアイテムの健全性を考慮するため、VCの状態変化に影響するエネルギー・物質(含RI)フローについて以下に述べることにする (Fig. 3.1-(4) 参照)。

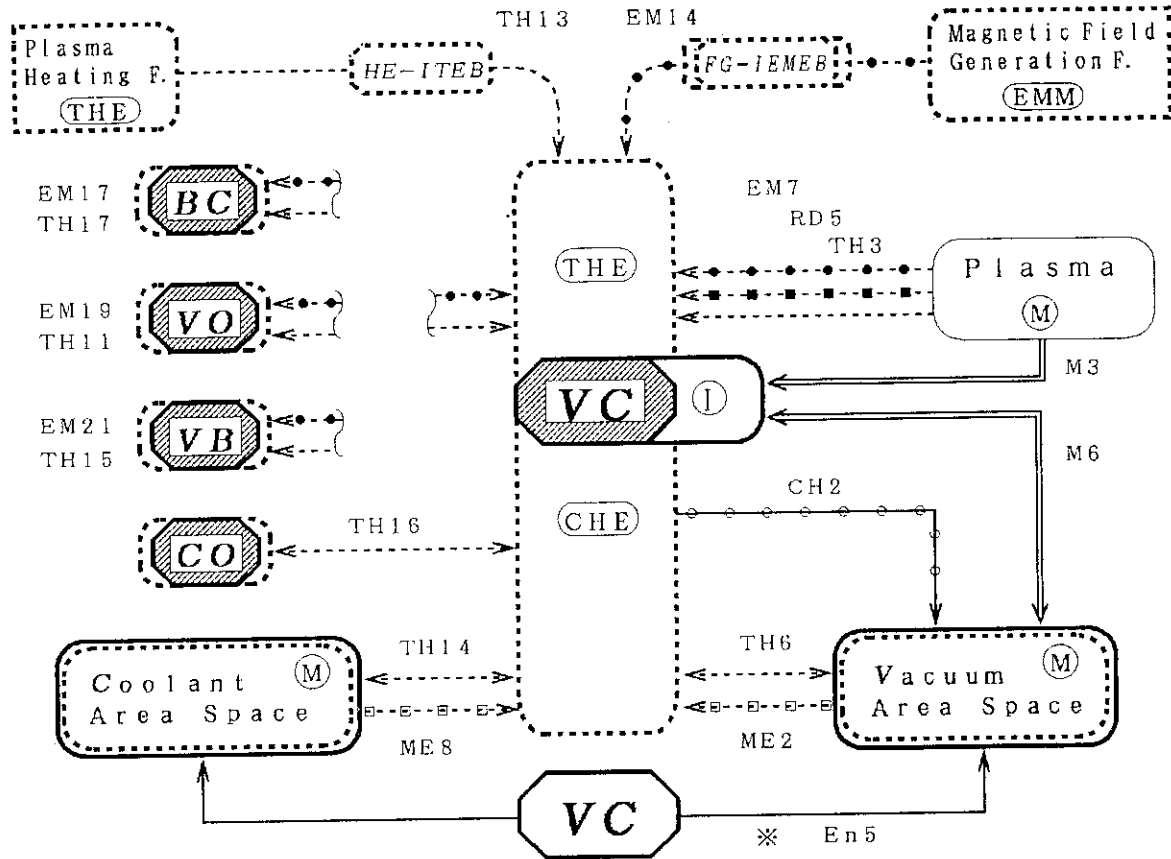


Fig. 3.1-(4) Mass and Energy Flows related to VC Boundary

電磁エネルギーフローは、磁場変動時あるいはプラズマディスラプション時にプラズマ、磁場形成機能電磁エネルギーバウンダリとの間に形成され(EM7, 14)、渦電流が誘起される。また、このとき同時にBC、VO、VBにも渦電流が誘起されており、これらの物質バウンダリとは相互誘導結合関係により電磁エネルギーフローが形成される(EM17, 19, 21)。

プラズマ点火時には、プラズマからのDT反応生成中性子の入射があり、放射エネルギーフローが形成され、内部に熱エネルギーとして蓄積される(RD5)。

熱エネルギーフローとしては、条件付きのフローとして、プラズマ点火時とプラズマディスラプション時におけるプラズマ損失エネルギーの一部の流入によるフロー(TH3)、プラズマ加熱機能作動時の加熱入力の一部の流入によるフロー(TH13)が考えられる。そして、常に形成されている熱エネルギーフローとして、エリア空間(真空、冷却材)との間の熱伝達によるもの(TH6, 14)、他の物質バウンダリ(VO、VB、CO、BC)との間の熱伝導あるいは熱輻射によるものが考えられる(TH11, 15, 16, 17)。

機械エネルギーフローは、VCバウンダリ健全時に、エリア空間（真空、冷却材）の圧力負荷によるものを考える(ME2, 8)。

内部の化学エネルギーソース（PFC材）は、化学反応によるエネルギー解放により、そのまま内部で熱エネルギーに変換されて蓄積されるか、真空エリア空間に反応生成物を伴った化学エネルギーフローが形成される(CH2)。

物質フローとしては、プラズマ点火時にプラズマからVCに入射するもの(M3)と真空エリア空間との間の吸収/脱離あるいは蒸発現象によるものが考えられる(M6)。

エネルギーを伴う物質フローとしては、VCバウンダリ破損時にVCバウンダリを通じて真空エリア空間と冷却材エリア空間との間の物質移動によるフローがVCに関連するフローとして考えられる(En5)。

VCバウンダリが保持している難移動性RIは、バウンダリの状態異常（温度）と真空エリア空間の状態異常（温度、圧力）に起因するトリチウムの脱離やPFC材の蒸発が起きて移動化する(M6)。

また、VCバウンダリは、バウンダリの状態異常に起因した熱的な影響（温度上昇）や機械的な影響（電磁応力・熱応力・真空エリア空間圧力・格納エリア空間圧力等による応力増大）が限界を越えた場合にバウンダリ破損を起こし、エネルギー・物質の異常フローを形成する(En5)。そして、これらの異常フローにより真空・冷却材エリア内のシステム構成要素の状態異常がエリア内RIの移動化やRI障壁であるVOやCOバウンダリの破損を誘発する可能性がある。

このようにVCバウンダリは事象シーケンス上で、他のシステム構成要素とのフローの変化により、RIの移動化やVCバウンダリ破損を起こして、さらにフローを変化させる。

これらのVCバウンダリに関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下のようなになる。

#### ・電磁エネルギーフロー

EM7 プラズマ異常による磁場変動で形成されるVCへのフロー

EM14 磁場形成機能異常による磁場変動で形成されるVCへのフロー

EM17 VC-B C間の相互電磁誘導現象によるフロー

EM19 VC-VO間の相互電磁誘導現象によるフロー

EM21 VC-V B間の相互電磁誘導現象によるフロー

#### ・放射エネルギーフロー

RD5 VCへのDT反応中性子入射によるフロー

#### ・熱エネルギーフロー

TH3 プラズマ損失エネルギーのVCへの流出によるフロー

TH6 VCと真空エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー

- TH11 VCとVOとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー
- TH13 プラズマ加熱機能による加熱入力VCへの流入分によるフロー
- TH14 VCと冷却材エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー
- TH15 VCとVBとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー
- TH16 VCとCOとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー
- TH17 VCとBCとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー

・機械エネルギーフロー

- ME2 VCへの真空エリア空間の圧力負荷を表すフロー
- ME8 VCへの冷却材エリア空間の圧力負荷を表すフロー

・化学エネルギーフロー

- CH2 VCの化学反応により真空エリア空間に流出するフロー

・物質フロー

- M3 VCへ入射するプラズマ拡散粒子により形成されるフロー
- M6 真空エリア空間との間の吸収／脱離あるいは蒸発現象によるフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

- En5 VC破損時の冷却材エリア空間－真空エリア空間間の物質移動によるフロー

1-(5) VBバウンダリ (真空－ブランケットエリア間物質バウンダリ)

真空エリア空間とブランケットエリア空間の間には物質境界VBが存在し、通常時には両空間の物質フローを遮断している。VBは、VOやVCとは違いブランケットエリア側においてもトリチウムを多く含む高温の空間(ブランケットエリア空間)と接しているので、真空エリア、ブランケットエリアの両側面において難移動性RI(吸蔵トリチウム、放射化物等)を保持していると考えられる。また、エネルギーに関しては、熱エネルギー、電磁エネルギーを蓄積するシステム構成要素と考える。更に、熱エネルギー(崩壊熱)、化学エネルギー(PFC材)ソースを内包しており、ともにバウンダリ内に解放されて蓄積される。化学エネルギーの解放は、エリア空間内に流入した空気や冷却材との接触によって発生する可能性がある。エネルギーの蓄積変化は、VBに流れる渦電流と温度の状態変化を追うことによって判る(Table 3.1-(5)参照)。

この物質バウンダリVBは、バウンダリの状態異常によっては両エリア側面の難移動性RIの移動化(=RI制御性の喪失)あるいはVBバウンダリ破損(=バウンダリ健全性の喪失)が起こる。但し、VBバウンダリの破損は直接的にはリークパスを形成することにはならないが、新たなRIの移動化あるいはバウンダリ破損を誘発する可能性がある。

このような守るべきアイテムの健全性を考慮するため、VBの状態変化に影響するエネルギー・物質(含RI)フローについて以下に述べることにする(Fig. 3.1-(5)参照)。

Table 3.1-(5) Symbols of VB Boundary in the system model

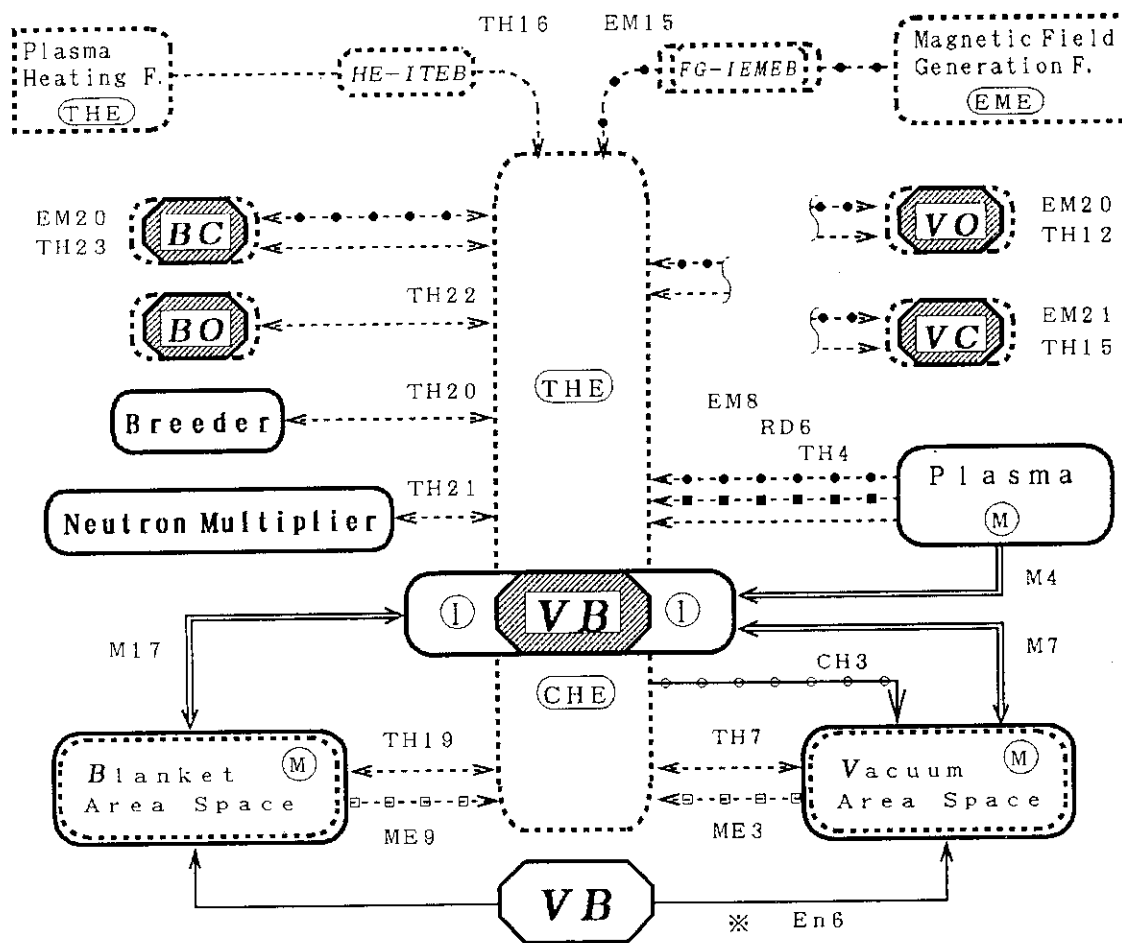
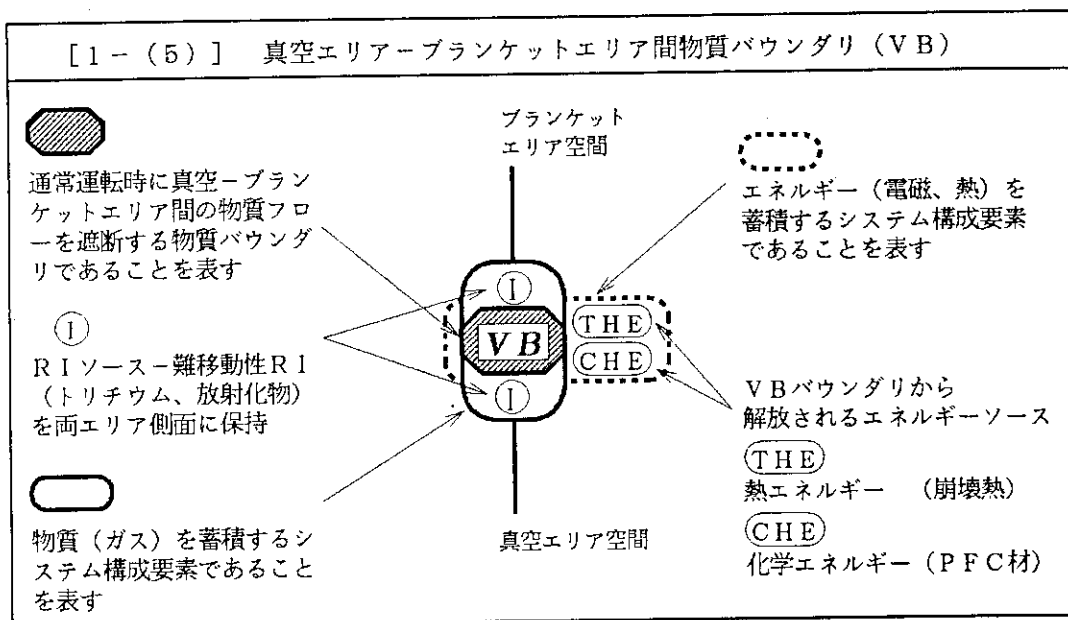


Fig. 3.1-(5) Mass and Energy Flows related to VB Boundary

電磁エネルギーフローは、磁場変動時あるいはプラズマディスラプション時にプラズマ、磁場形成機能電磁エネルギーバウンダリとの間に形成され(EM8, 15)、渦電流が誘起される。また、このとき同時にBC、VO、VCにも渦電流が誘起されており、これらの物質バウンダリとは相互誘導結合関係により電磁エネルギーフローが形成される(EM18, 20, 21)。

プラズマ点火時には、プラズマからのDT反応生成中性子の入射があり、放射エネルギーフローが形成され、内部に熱エネルギーとして蓄積される(RD6)。

熱エネルギーフローとしては、条件付きのフローとして、プラズマ点火時とプラズマディスラプション時におけるプラズマ損失エネルギーの一部の流入によるフロー(TH4)、プラズマ加熱機能作動時の加熱入力の一部の流入によるフロー(TH18)が考えられる。そして、常に形成されている熱エネルギーフローとして、エリア空間(真空、ブランケット)との間の熱伝達によるもの(TH7, 19)、真空バウンダリ(VO、VC)やブランケットバウンダリ(BC、BO)との間の熱伝導あるいは熱輻射によるもの(TH12, 15, 22, 23)をここでは考える。また、固体増殖材と中性子増倍材使用の設計の場合には、これらとの熱輻射や熱伝導によるフローを考慮すべきである(TH20, 21)。

機械エネルギーフローは、VBバウンダリ健全時に、エリア空間(真空、ブランケット)の圧力負荷によるものを考える(ME3, 9)。

内部の化学エネルギーソース(PFC材)は、化学反応によるエネルギー解放により、そのまま内部で熱エネルギーに変換されて蓄積されるか、真空エリア空間に反応生成物を伴った化学エネルギーフローが形成される(CH3)。

物質フローとしては、プラズマ点火時にプラズマからVBに入射するもの(M4)と真空エリア空間、ブランケットエリア空間それぞれとの間の吸収/脱離あるいは蒸発現象によるものが考えられる(M7, 17)。

エネルギーを伴う物質フローとしては、VBバウンダリ破損時にVBバウンダリを通じて真空エリア空間とブランケットエリア空間との間の物質移動によるフローがVBに関連するフローとして考えられる(En6)。

VBバウンダリが保持している難移動性RIは、バウンダリの状態異常(温度)と真空エリア空間の状態異常(温度、圧力)に起因するトリチウムの脱離やPFC材の蒸発が起きて移動化する(M7)。

また、VBバウンダリは、バウンダリの状態異常に起因した熱的な影響(温度上昇)や機械的な影響(電磁応力・熱応力・真空エリア空間圧力・格納エリア空間圧力等による応力増大)が限界を越えた場合にバウンダリ破損を起こし、エネルギー・物質の異常フローを形成する(En6)。そして、これらの異常フローにより真空・冷却材エリア内のシステム構成要素の状態異常がエリア内RIの移動化やRI障壁であるVOやBOバウンダリの破損を誘発する可能性がある。

このようにVBバウンダリは事象シーケンス上で、他のシステム構成要素とのフローの変化により、RIの移動化やVBバウンダリ破損を起こして、さらにフローを変化させる。

これらのVBバウンダリに関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下のようになる。

・電磁エネルギーフロー

- EM8 プラズマ異常による磁場変動で形成されるVBへのフロー
- EM15 磁場形成機能異常による磁場変動で形成されるVBへのフロー
- EM18 VB-BC間の相互電磁誘導現象によるフロー
- EM20 VB-VO間の相互電磁誘導現象によるフロー
- EM21 VB-VC間の相互電磁誘導現象によるフロー

・放射エネルギーフロー

- RD6 VBへのDT反応生成中性子入射によるフロー

・熱エネルギーフロー

- TH4 プラズマ損失エネルギーのVBへの流入によるフロー
- TH7 VBと真空エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー
- TH12 VBとVOとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー
- TH15 VBとVCとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー
- TH18 プラズマ加熱機能による加熱入力のVBへの流入分によるフロー
- TH19 VBとブランケットエリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー
- TH20 VBと増殖材との間に形成される熱輻射あるいは熱伝導によるフロー
- TH21 VBと中性子増倍材との間に形成される熱輻射あるいは熱伝導によるフロー
- TH22 VBとBOとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー
- TH23 VBとBCとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー

・機械エネルギーフロー

- ME3 VBへの真空エリア空間の圧力負荷を表すフロー
- ME9 VBへのブランケットエリア空間の圧力負荷を表すフロー

・化学エネルギーフロー

- CH3 VBの化学反応により真空エリア空間に流出するフロー

・物質フロー

- M4 VBへ入射するプラズマ拡散粒子により形成されるフロー
- M7 真空エリア空間との間の吸収/脱離あるいは蒸発現象によるフロー
- M17 ブランケットエリア空間との間の吸収/脱離あるいは蒸発現象によるフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

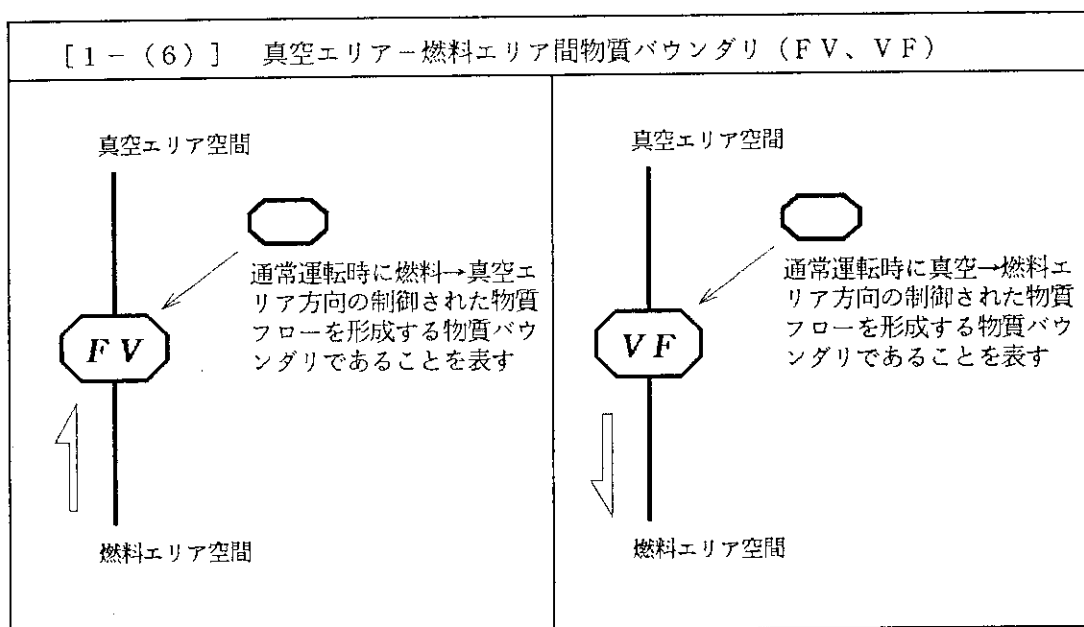
- En6 VB破損時のブランケットエリア空間-真空エリア空間間の物質移動により形成されるフロー

1-(6) FV, VFバウンダリ (真空-燃料エリア間物質バウンダリ)

真空エリア空間と燃料エリア空間との間には、通常時においても互いに逆方向の2通りの物質フロー(燃料供給と粒子排気)が形成されており、それぞれ制御機能(燃料供給機能と粒子排気機能)によって流量が制御されている。そこで、燃料供給の物質フローが形成される物質境界をFVバウンダリ、粒子排気の物質フローが形成される物質境界をVFバウンダリとする。

FV、VFバウンダリは、真空-燃料エリア間の接続貫通部であり、エネルギー、物質の蓄積による状態変化を考慮する必要はない(Table 3.1-(6)参照)。

Table 3.1-(6) Symbols of FV, VF Boundary in the system model



しかしながら、真空エリア空間と燃料エリア空間の状態によって、つまり、両エリア間の圧力差の増大によってFV、VFバウンダリ破損をシーケンス上で考える。あるいは、それぞれのバウンダリにおいて制御を行っている制御機能の喪失によって両エリア間に異常フローが形成される。

FV、VFバウンダリの破損は直接的にはリークパスを形成しないが、新たなRIの移動化あるいはバウンダリ破損を誘発する可能性がある。このFV、VFバウンダリに関連するエネルギー・物質(含RI)フローを以下にまとめた(Fig. 3.1-(6)a, b参照)。

(6)a FVバウンダリ

FVバウンダリに関連しているエネルギー・物質フローには以下のようなフローが考えられる(Fig. 3.1-(6)a参照)。

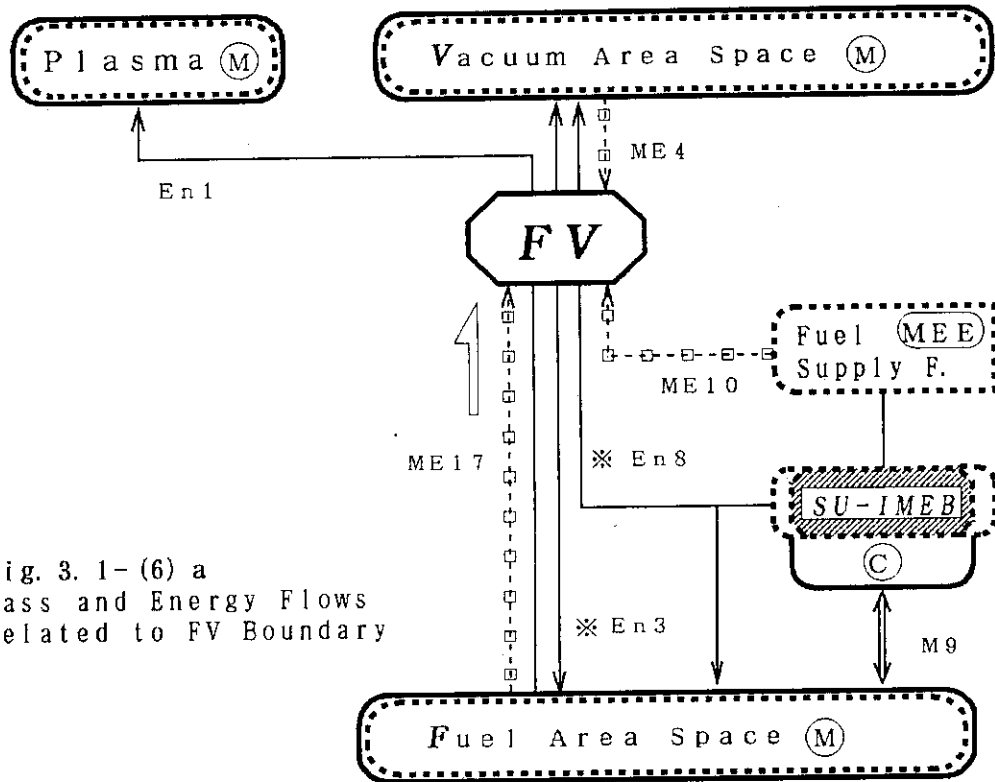


Fig. 3. 1- (6) a  
Mass and Energy Flows  
related to FV Boundary

燃料供給機能作動時には、燃料供給機能の機械エネルギーによる制御(ME10)により、燃料エリア空間→プラズマ方向にエネルギーを伴う物質フロー(En1)が形成されている。このフローは、燃料供給機能の制御異常が原因のフロー量の異常によってプラズマの状態異常を引き起こす可能性がある。また、両エリア空間からの圧力負荷によって、機械エネルギーフローが形成されている(ME4, 17)。

FVバウンダリ破損が起こった場合には、物質(含RI)を伴うエネルギーの異常フローが燃料エリア空間と真空エリア空間との間に形成される(En3)。このフローは、両エリア空間の圧力差や各粒子の濃度差による物質移動であり、両エリア空間の状態によってフローの向きや流量が変化する。

また、燃料供給機能の内部機械エネルギーバウンダリ(SU-IMEB)の破損が起こると、機能内部の流体の放出により、真空・燃料エリアに物質を伴うエネルギーフローが形成される。このうち、真空エリアへの流入フローはFVバウンダリを通過する(En8)。

このようにFVバウンダリは事象シーケンス上で、他のシステム構成要素とのフローの変化により、FVバウンダリ破損を起こして、さらにフローを変化させる。

FVバウンダリに関連するエネルギー・物質フローを改めて以下のようにまとめる。

- ME4 FVへの真空エリア空間の圧力負荷による機械エネルギーフロー
- ME17 FVへの燃料エリア空間の圧力負荷による機械エネルギーフロー



ME10 通常運転時の En1フロー（燃料供給）を制御する燃料供給機能の高圧機器による機械エネルギーフロー

En1 プラズマ点火・燃料供給機能作動時に、燃料供給機能の制御(ME10)により燃料エリア空間→プラズマ方向に形成される物質を伴うエネルギーフロー

En3 FVバウンダリ破損時に真空エリア空間-燃料エリア空間間の物質移動により形成される物質を伴うエネルギーフロー

En8 SU-IMEB破損時に放出される物質（冷凍材等）の真空エリア空間流入分によるフロー

(6)b VFバウンダリ

VFバウンダリに関連しているエネルギー・物質フローには以下のようなフローが考えられる (Fig. 3.1-(6)b 参照)。

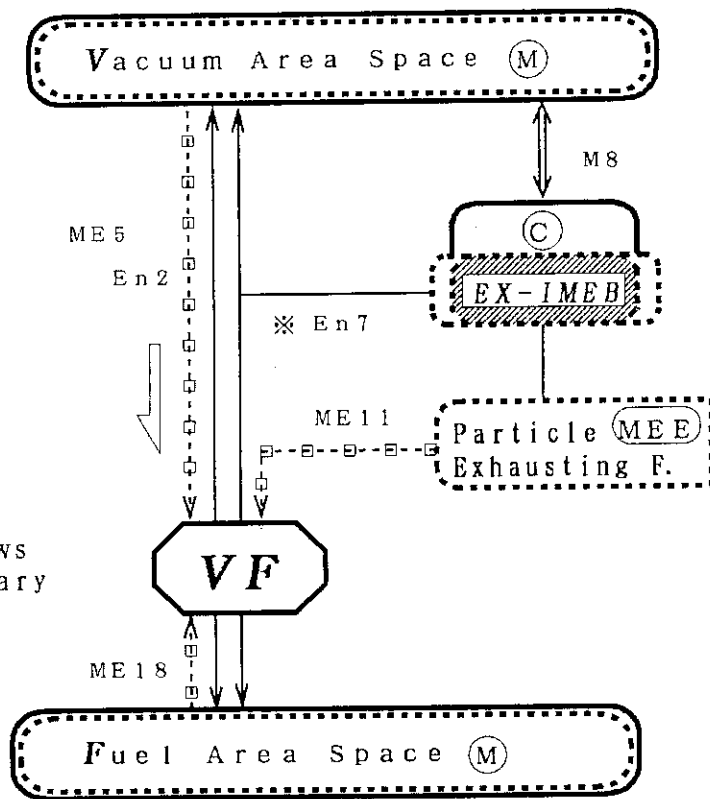


Fig. 3.1-(6)b  
Mass and Energy Flows  
related to VF Boundary

通常運転時には、粒子排気機能の機械エネルギーによる制御(ME11)により、真空エリア空間→燃料エリア空間方向に物質を伴うエネルギーフロー(En2)が形成されている。このフローは、粒子排気機能の制御異常が原因のフロー量の異常によって両エリア空間の状態異常を引き起こす可能性がある。また、両エリア空間からの圧力負荷によって、機械エネルギーフローが形成されている(ME5, 18)。

V F バウンダリ破損が起こった場合には、En2 フローは、両エリア空間の圧力差や各粒子の濃度差による物質移動が駆動力となり、両エリア空間の状態によってフローの向きや流量が変化するようになる。

また、粒子排気機能の内部機械エネルギーバウンダリ (E X - I M E B) の破損が起こると、機能内部の物質の放出により、真空・燃料エリアに物質を伴うエネルギーフローが形成される。このうち、真空エリアへの流入フローが En7である。

このようにV F バウンダリは事象シーケンス上で、他のシステム構成要素との間に形成されるフローの変化により、バウンダリ破損を起こして、さらにフローを変化させる。

V F バウンダリに関連するエネルギー・物質フローを改めて以下のようにまとめる。

- ME5 真空エリア空間の圧力負荷による機械エネルギーフロー
- ME18 燃料エリア空間の圧力負荷による機械エネルギーフロー
- ME11 通常運転時の En2フロー (粒子排気) を制御する粒子排気機能の回転機器による機械エネルギーフロー
- En2 真空エリア空間と燃料エリア空間との間に形成されるエネルギーを伴う物質フロー条件により、フローの向き・フロー量は以下のように変化する。
  - ①プラズマ点火・粒子排気機能作動時に、粒子排気機能の制御(ME11)により真空エリア空間→燃料エリア空間 (一方向のフロー) に形成されるフロー
  - ②V F バウンダリ破損時に、真空エリアと燃料エリアとの (圧力差、濃度差などによる) 物質移動により形成されるフロー
- En7 E X - I M E B破損時に放出される物質 (冷凍材等) の真空エリア空間流入分によるフロー

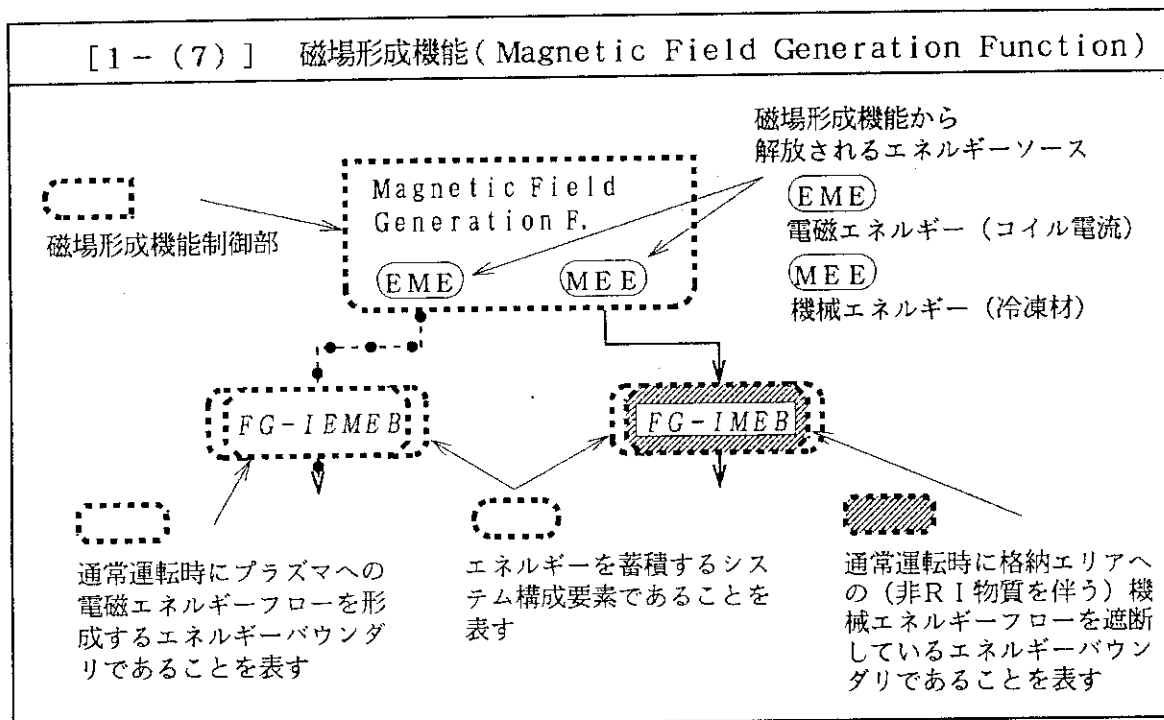
#### 1-(7) 磁場形成機能

磁場形成機能は、真空エリア内部にプラズマを閉じ込めるための磁気容器を形成する機能である。本機能はエネルギーフローを明らかにするために、磁場形成機能制御部、機能内部電磁エネルギーバウンダリ (F G - I E M E B) 、機能内部機械エネルギーバウンダリ (F G - I M E B) に分解される (Table 3.1-(7) 参照) 。

機能制御部は、磁場形成機能がシステム制御に用いる電磁エネルギーソースと機械エネルギー (冷凍材のエンタルピーによるエネルギー) ソースを内包している。

そして、それぞれのエネルギーソースの解放に対する障壁として、電磁エネルギーソースに対して機能内部電磁エネルギーバウンダリ (F G - I E M E B) 、機械エネルギーソースに対して機能内部機械エネルギーバウンダリ (F G - I M E B) があり、それぞれ、F G - I E M E Bは、通常運転時にも電磁エネルギーフローを形成するエネルギーバウンダリ、F G - I M E Bは、通常運転時に機械エネルギーの解放を遮断しているエネルギーバウンダリと考える。

Table 3.1-(7) Symbols of Magnetic Field Generation Function in the system model



磁場形成機能に関連しているエネルギー・物質フローには以下のようなフローが考えられる (Fig. 3.1-(7) 参照)。

電磁エネルギーフローは通常運転時にプラズマとの間に形成されており (EM1)、内部電磁エネルギーバウンダリ (FG-IMEB) は通常時にエネルギーフローを形成しているエネルギーバウンダリである。また、FG-IMEBは電磁エネルギーを蓄積する。しかし、機能の制御異常あるいはFG-IMEB破損により、プラズマ以外に、各真空バウンダリ (VO、VC、VB、BC)、磁場形成機能・粒子排気機能・燃料供給機能それぞれの内部機械エネルギーバウンダリに異常フローが形成され (EM9~15)、これらのシステム構成要素に電磁エネルギーが流入・蓄積されて渦電流が誘起される。また、プラズマ異常によりFG-IMEB間の EM1フローの変化とFG-IMEBへの電磁エネルギーフローが形成される (EM2)。これらの渦電流が電磁力あるいはジュール熱という形態で機械エネルギー、熱エネルギーに変換されると、バウンダリ破損、機能内部エネルギー解放などの新たな異常を招く可能性がある。

機械エネルギーフローは、通常運転時には格納エリア空間への解放が遮断されており、内部機械エネルギーバウンダリ (FG-IMEB) は通常時にエネルギーフローを遮断しているエネルギーバウンダリである。また、FG-IMEBは電磁エネルギーと熱エネルギーを蓄積する。この時、FG-IMEBは機能制御部と格納エリア空間からの圧力負荷による機械エネルギーフローが形成されている (ME12, 13)。異常時にFG-IMEB破損が起これると、格納エリア空間に冷凍材が放出・膨張し、物質 (RIを含まない) を伴うエ

エネルギーフロー（主に機械エネルギー）が形成される(En9)。

磁場形成機能は事象シーケンス上で、初期異常起因として「磁場形成機能制御異常」、初期異常起因あるいは二次的な異常起因として「磁場形成機能内部機械エネルギー異常解放」、「磁場形成機能内部電磁エネルギー解放」が起こることが考えられる。このうち、両エネルギー解放は、それぞれのエネルギーバウンダリの状態異常が原因となる。

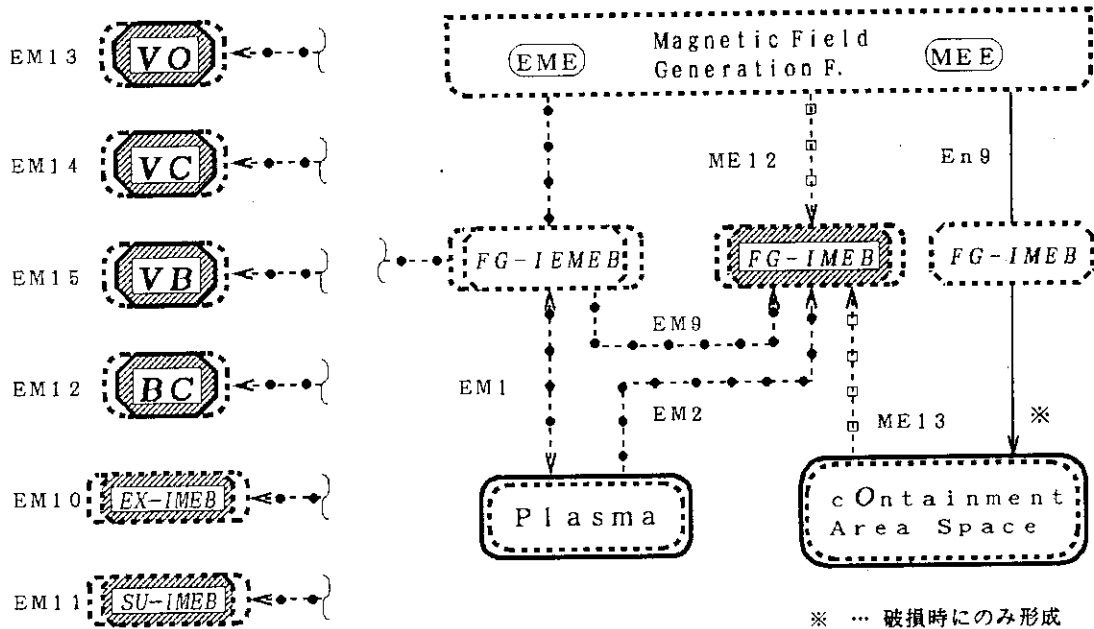


Fig. 3. 1-(7)  
Mass and Energy Flows related to Magnetic Field Generation Function

磁場形成機能に関連するエネルギー・物質フローを改めて以下のようにまとめる。

・電磁エネルギーフロー

- EM1 プラズマとの間の相互誘導現象により形成されるフロー
- EM2 プラズマ異常による磁場変動で形成されるFG-IMEBへのフロー
- EM9 磁場形成機能異常による磁場変動で形成されるFG-IMEBへのフロー
- EM10 磁場形成機能異常による磁場変動で形成されるEX-IMEBへのフロー
- EM11 磁場形成機能異常による磁場変動で形成されるSU-IMEBへのフロー
- EM12 磁場形成機能異常による磁場変動で形成されるBCへのフロー
- EM13 磁場形成機能異常による磁場変動で形成されるVOへのフロー
- EM14 磁場形成機能異常による磁場変動で形成されるVCへのフロー
- EM15 磁場形成機能異常による磁場変動で形成されるVBへのフロー

・機械エネルギーフロー

- ME12 内包機械エネルギーソース（冷凍材）の圧力負荷により形成される

FG-IMEBへのフロー

ME13 格納空間の圧力負荷により形成されるFG-IMEBへのフロー

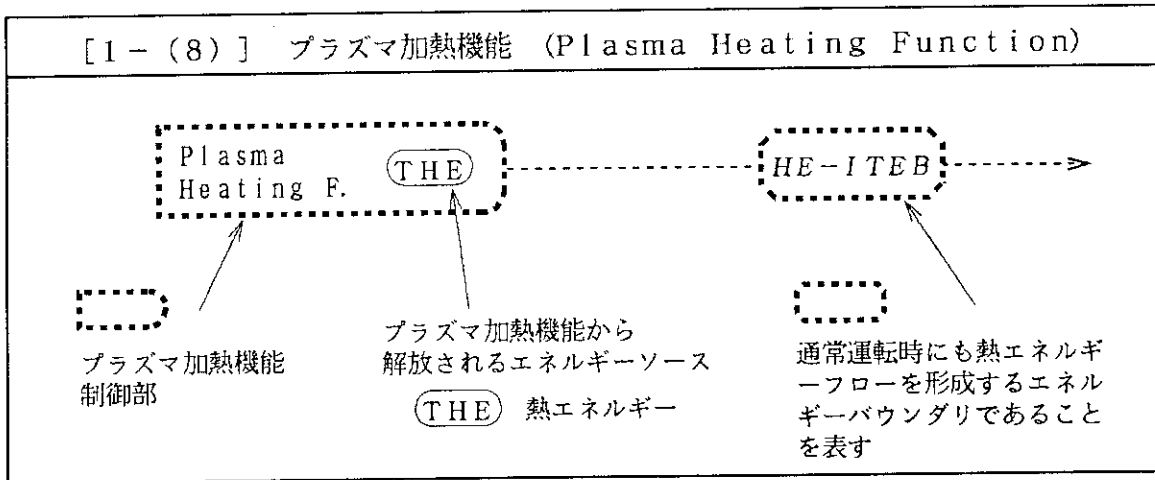
・エネルギーを伴う物質フロー

En9 FG-IMEB破損時に放出される物質の格納エリア空間流入分によるフロー

1-(8) プラズマ加熱機能

プラズマ加熱機能はプラズマ外部からプラズマにエネルギーを注入する機能である。本機能には機器のオプションとして中性粒子加熱あるいは高周波加熱方式があるが、ここでは選択に係わらず、最終的にプラズマに熱エネルギーが注入されると考える。そこで、この熱エネルギーフローを示すために、本機能をプラズマ加熱機能制御部とプラズマ加熱機能内部熱エネルギーバウンダリ (HE-ITEB) に分解する (Table 3-1-(8) 参照)。

Table 3.1-(8) Symbols of Plasma Heating Function in the system model



プラズマ加熱機能によって形成される熱エネルギーフローは、プラズマ加熱機能制御部から放出されて機能内部熱エネルギーバウンダリ (HE-ITEB) によって分配され、プラズマと真空エリアバウンダリであるVO、VC、VBへのフローがそれぞれ形成される (TH1, 9, 13, 18)。異常時には、事象シーケンス上で「プラズマ加熱機能制御異常」あるいは「プラズマ加熱機能内部熱エネルギー異常解放」により、これらのフローのエネルギー流量、あるいは構成要素それぞれへの分配比率が変化して、関連するシステム構成要素の状態異常を招き、プラズマ崩壊やバウンダリ破損 (VO、VB、VC) などを招く可能性がある (Fig. 3.1-(8) 参照)。

「プラズマ加熱機能制御異常」は上記のフローでいえば制御部から放出される全加熱入力エネルギーが異常な値になる異常起因、「プラズマ加熱機能内部熱エネルギー異常解放」は、上記の TH1, 9, 13, 18の全加熱入力エネルギーの配分が異常な比となる異常起因と考え区別する。

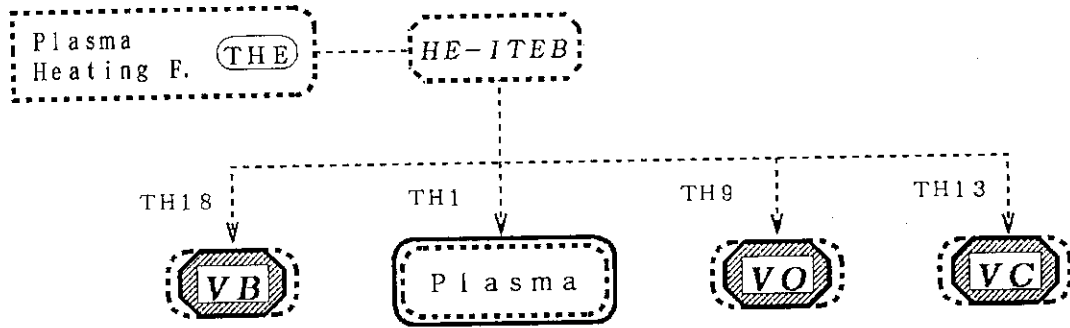


Fig 3.1-(8) Mass and Energy Flows related to Plasma Heating Function

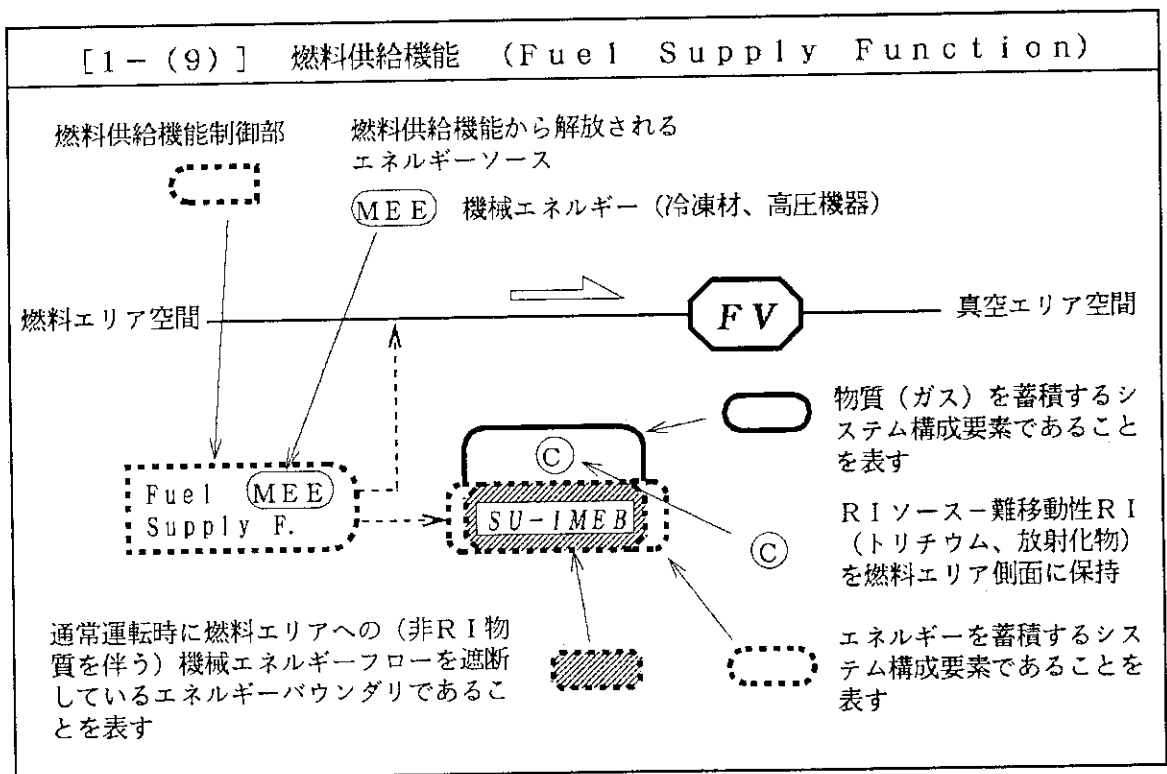
Fig. 3.1-(8) で示した物質・エネルギーフローをまとめると以下のようなになる。

・熱エネルギーフロー

- TH1 プラズマ加熱機能による加熱入力のプラズマへの流入分によるフロー
- TH9 プラズマ加熱機能による加熱入力のVOへの流入分によるフロー
- TH13 プラズマ加熱機能による加熱入力のVCへの流入分によるフロー
- TH18 プラズマ加熱機能による加熱入力のVBへの流入分によるフロー

1-(9) 燃料供給機能

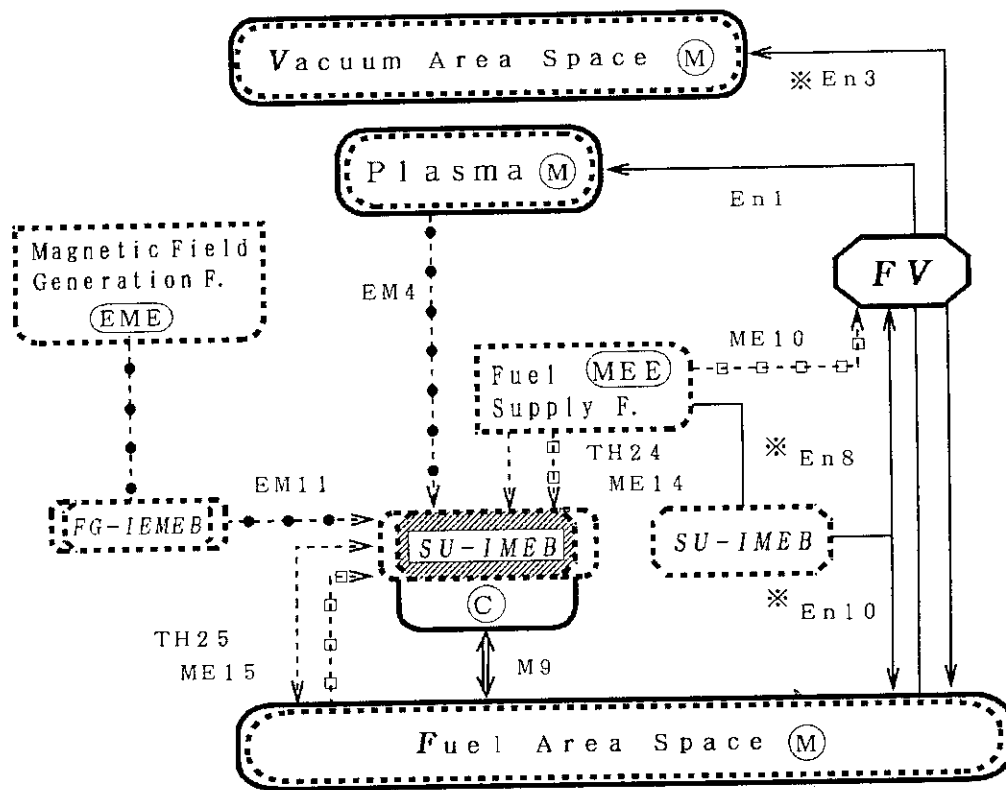
Table 3.1-(9) Symbols of Fuel Supply Function in the system model



燃料供給機能は、プラズマに燃料物質を供給する機能であり、燃料エリアと真空エリアの境界に位置している。本機能は、燃料供給機能制御部、機能内部機械エネルギーバウンダリ (SU-IMEB) に分解される (Fig. 3.1-(9) 参照)。

制御部には高圧機器等による機械エネルギーと冷凍材のエンタルピーによるエネルギーソースが内包されている。そして、機能内部機械エネルギーバウンダリは通常運転時に冷凍材のエンタルピーによるエネルギーの解放を阻止している。また、このエネルギーバウンダリは熱エネルギー、電磁エネルギーを蓄積するシステム構成要素であり、機能制御 R I を保持する要素である。

燃料供給機能に関連するエネルギー・物質フローを Fig. 3.1-(9) に示す。



※ … 破損時にのみ形成

Fig 3. 1-(9) Mass and Energy Flows related to Fuel Supply Function

機械エネルギーの制御により (ME10)、通常時には F V バウンダリを通して燃料エリア空間からプラズマへ物質 (含 R I) を伴うエネルギーフローを形成している (En1)。しかし、異常時には、制御異常により真空エリア空間-燃料エリア空間に異常フロー (エネルギーを伴う物質フロー) が形成される可能性がある (En3)。

冷凍材のエンタルピーによるエネルギーは、通常時には他のシステムへのフローが S U - I M E B によって遮断されている。しかし、この機能内部エネルギーバウンダリは、機能制御部と燃料エリア空間との間に熱エネルギーフロー (TH24, 25) が形成され、さらにプラズマ・コイルとの間の電磁エネルギーフロー (EM4, 11)、燃料エリア空間と冷凍材の圧力

負荷による機械エネルギーフロー (ME14, 15)などが形成されている。これらのフロー量異常による蓄積エネルギー異常から、内部エネルギーバウンダリSU-IMEB破損が起こると、燃料エリア空間と真空エリア空間の両空間へ冷凍材放出・膨張が起こり、エネルギー（主に機械エネルギー）を伴う物質（RIを含まない）フロー(En8, 10)が形成される。

また、内部エネルギーバウンダリSU-IMEBは機能制御性RIを保持しており、蓄積熱エネルギー異常によるRIの移動化の可能性がある(M9)。

燃料供給機能は事象シーケンス上で、初期異常起因として「燃料供給機能制御異常」、初期異常起因あるいは二次的な異常起因として「燃料供給機能内部機械エネルギー異常解放」が起こることが考えられる。このうち、機械エネルギー解放は、内部エネルギーバウンダリの状態異常による破損が原因となる。

Fig. 3.1-(9) で示した物質・エネルギーフローをまとめると、以下のようになる。

・電磁エネルギーフロー

EM4 プラズマ異常による磁場変動で形成されるSU-IMEBへのフロー

EM11 磁場形成機能異常による磁場変動で形成されるSU-IMEBへのフロー

・熱エネルギーフロー

TH24 機能制御部による冷却作用により形成されるフロー

TH25 SU-IMEBと燃料エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー

・機械エネルギーフロー

ME10 通常運転時の En1フロー（燃料供給）を制御する燃料供給機能の高圧機器により形成されるフロー

ME14 冷凍材の圧力により形成されるSU-IMEBへのフロー

ME15 燃料エリア空間の圧力負荷により形成されるSU-IMEBへのフロー

・物質フロー

M9 SU-IMEBと燃料エリア空間間の吸着／脱離現象によるフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

En1 燃料供給機能の制御による供給燃料のフロー（燃料供給機能作動時）

En3 FV破損時の燃料エリア空間-真空エリア空間間の物質移動によるフロー

En8 SU-IMEB破損時に放出される物質の真空エリア空間流入分によるフロー

En10 SU-IMEB破損時に放出される物質の燃料エリア空間流入分によるフロー

1-(10) 粒子排気機能

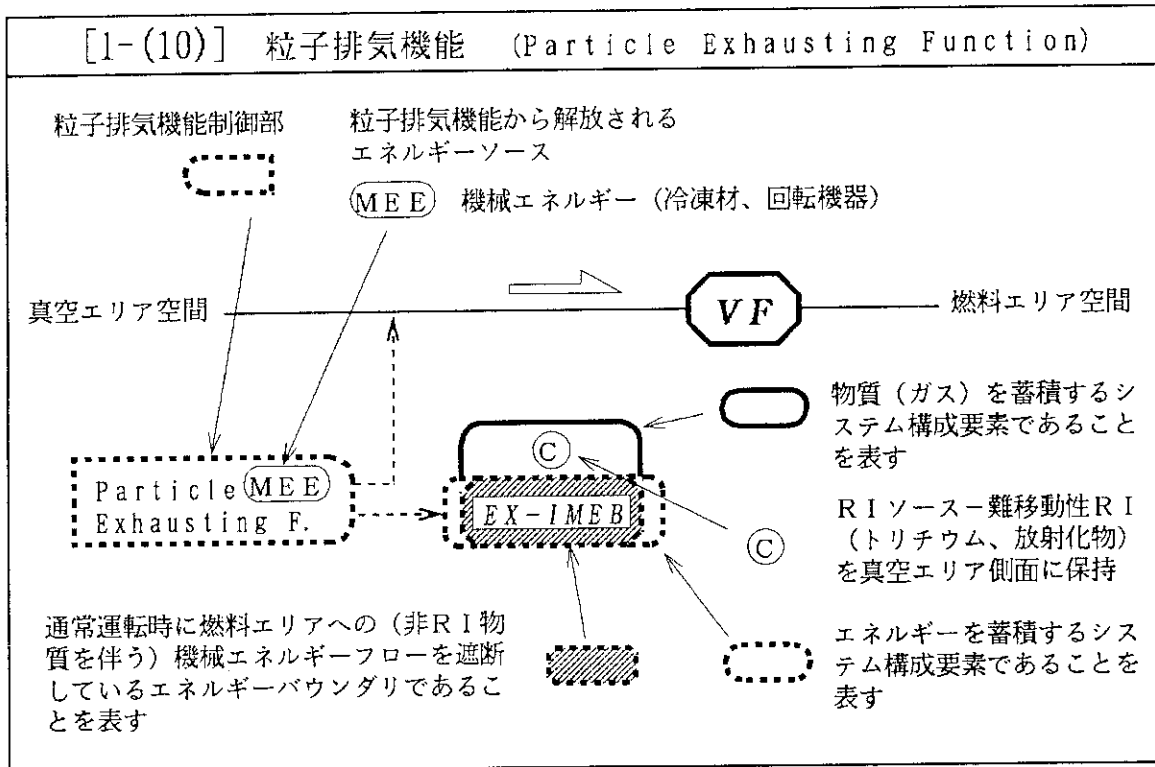
粒子排気機能は、真空エリア空間内の気体粒子を排気する機能であり、真空エリアと燃料エリアの境界に位置している。本機能は、粒子排気機能制御部、機能内部機械エネルギー



ーバウンダリ (EX-IMEB) に分解される (Table 3.1-(10) 参照)。

制御部には回転機器等による機械エネルギーと冷凍材のエンタルピーによるエネルギーソースが内包されている。そして、機能内部機械エネルギーバウンダリは通常運転時に冷凍材のエンタルピーによるエネルギーの解放を阻止している。また、このエネルギーバウンダリは熱エネルギー、電磁エネルギーを蓄積するシステム構成要素であり、機能制御RIを保持する要素である。

Table 3.1-(10) Symbols of Particle Exhausting Function in the system model



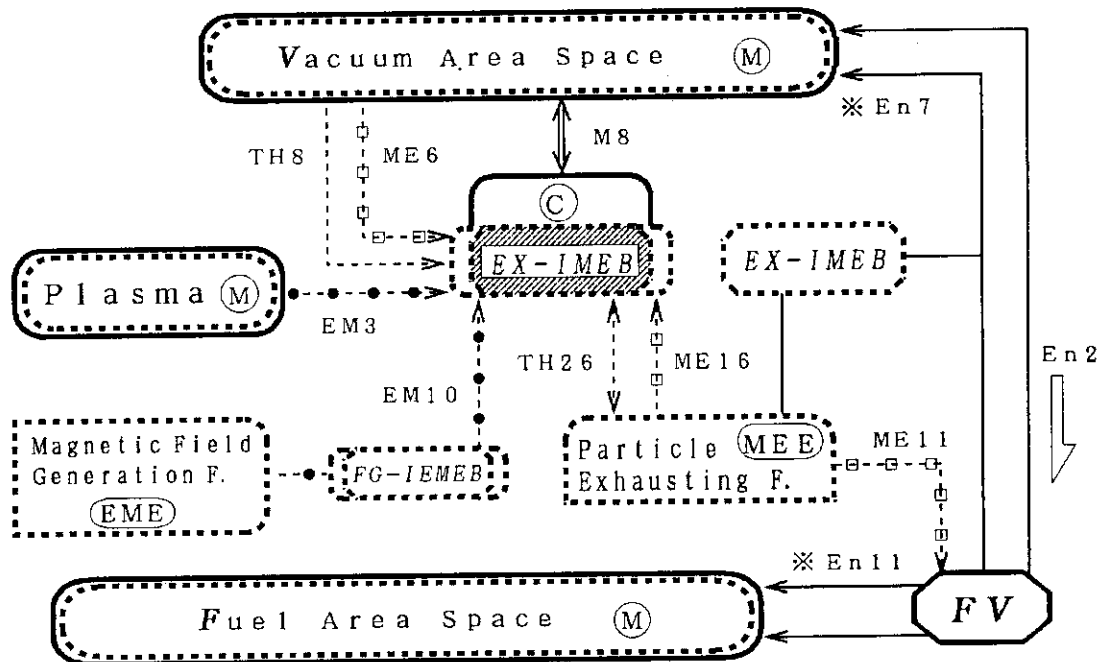
次に、粒子排気機能に関連するエネルギー・物質フローを以下に示す (Fig. 3.1-(10) 参照)。

機械エネルギーの制御により (ME11)、通常時にはVFバウンダリを通して真空エリア空間から燃料エリア空間へエネルギーを伴う物質フロー (含RI) を形成している (En2)。しかし、異常時には、制御異常によりEn2フローの向きや流量が変化する可能性がある。

冷凍材のエンタルピーによるエネルギーは、通常時には他のシステムへのフローがEX-IMEBによって遮断されている。しかし、この機能内部エネルギーバウンダリは、機能制御部・真空エリア空間との間の熱エネルギーフロー (TH26, 8)、プラズマ・コイルとの間の電磁エネルギーフロー (EM3, 10)、真空エリア空間と冷凍材の圧力負荷による機械エネルギーフロー (ME6, 16) などが形成されており、これらのフロー量異常による蓄積エネルギー異常から、内部エネルギーバウンダリEX-IMEB破損が起これば、真空エリア空間と燃料エリア空間の両空間へ冷凍材放出・膨張が起これば、エネルギー (主に機械エネルギー

一) を伴う物質 (RI を含まない) フロー (En7, 11) が形成される。また、内部エネルギーバウンダリ EX-IMEB は機能制御性 RI を保持しており、蓄積熱エネルギー異常による RI の移動化の可能性がある (M8)。

粒子排気機能は事象シーケンス上で、初期異常起因として「粒子排気機能制御異常」、初期異常起因あるいは二次的な異常起因として「粒子排気機能内部機械エネルギー異常解放」が起こることが考えられる。このうち、機械エネルギー解放は、内部エネルギーバウンダリの状態異常による破損が原因となる。



※ … 破損時のみ形成

Fig. 3.1-(10)

Mass and Energy Flows related to Particle Exhausting Function

Fig. 3.1-(10) で示した物質・エネルギーフローを改めてまとめると、以下のようになる。

・電磁エネルギーフロー

EM3 プラズマ異常による磁場変動で形成される EX-IMEB へのフロー

EM10 磁場形成機能異常による磁場変動で形成される EX-IMEB へのフロー

・熱エネルギーフロー

TH8 EX-IMEB と真空エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー

TH26 機能制御部による冷却作用により形成されるフロー

・機械エネルギーフロー

ME11 通常運転時の En2 フロー (粒子排気) を制御する粒子排気機能の回転機器により形成されるフロー

ME16 冷凍材の圧力により形成されるEX-IMEBへのフロー

ME6 真空エリア空間の圧力負荷により形成されるEX-IMEBへのフロー

・物質フロー

M8 EX-IMEBと真空エリア空間間の吸着/脱離現象によるフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

En2 (通常運転時) 粒子排気機能の制御による排気粒子のフロー

(VF破損時) 真空エリア空間-燃料エリア空間間の物質移動によるフロー

En7 EX-IMEB破損時に放出される物質の真空エリア空間流入分によるフロー

En11 EX-IMEB破損時に放出される物質の燃料エリア空間流入分によるフロー

### 3.1.2 真空エリアにおける異常事象の抽出

3.1.1において、真空エリアに属するシステム構成要素それぞれの通常運転時・異常時に形成されるエネルギー・物質フローを抽出した。

異常時には、これらのフローの中の1つあるいは複数のフローの異常から始まり、バウンダリの破損やRIの移動化によって、苛酷さを増しながら異常が伝播していくことになる。その伝播のパターンで支配的なものを抽出し、それに対する安全防護対策を定量的に考えることこそ本研究の目的である。

異常の伝播は、システムモデル上では Fig.3-1B に示すようなプロセスであると考え。つまり、

#### ①初期異常起因の発生

異常伝播の始まりである初期異常起因は、制御機能の制御異常、機能内部エネルギーバウンダリ破損による機能内部エネルギーの解放、そして、物質バウンダリの破損である。

#### ②システム内エネルギー・物質の異常フローの形成

異常起因によって、システム構成要素間で、フロー量の異常や新たなフローの形成が発生して、システム内物質/エネルギー蓄積要素への流出流入に異常が生じる。

#### ③システム構成要素の状態異常

システム内エネルギー・物質の異常フローにより、システム内のエネルギー・物質蓄積要素のうち、この異常フローに関連するものは、エネルギー・物質蓄積量の異常により状態変化を起こす。例えば、エリア空間では、温度・圧力の上昇が異常な状態に移行していくことが考えられる。

#### ④システム構成要素の応答

エネルギー・物質蓄積要素の状態異常がある段階に達すると、構成要素の中には、この

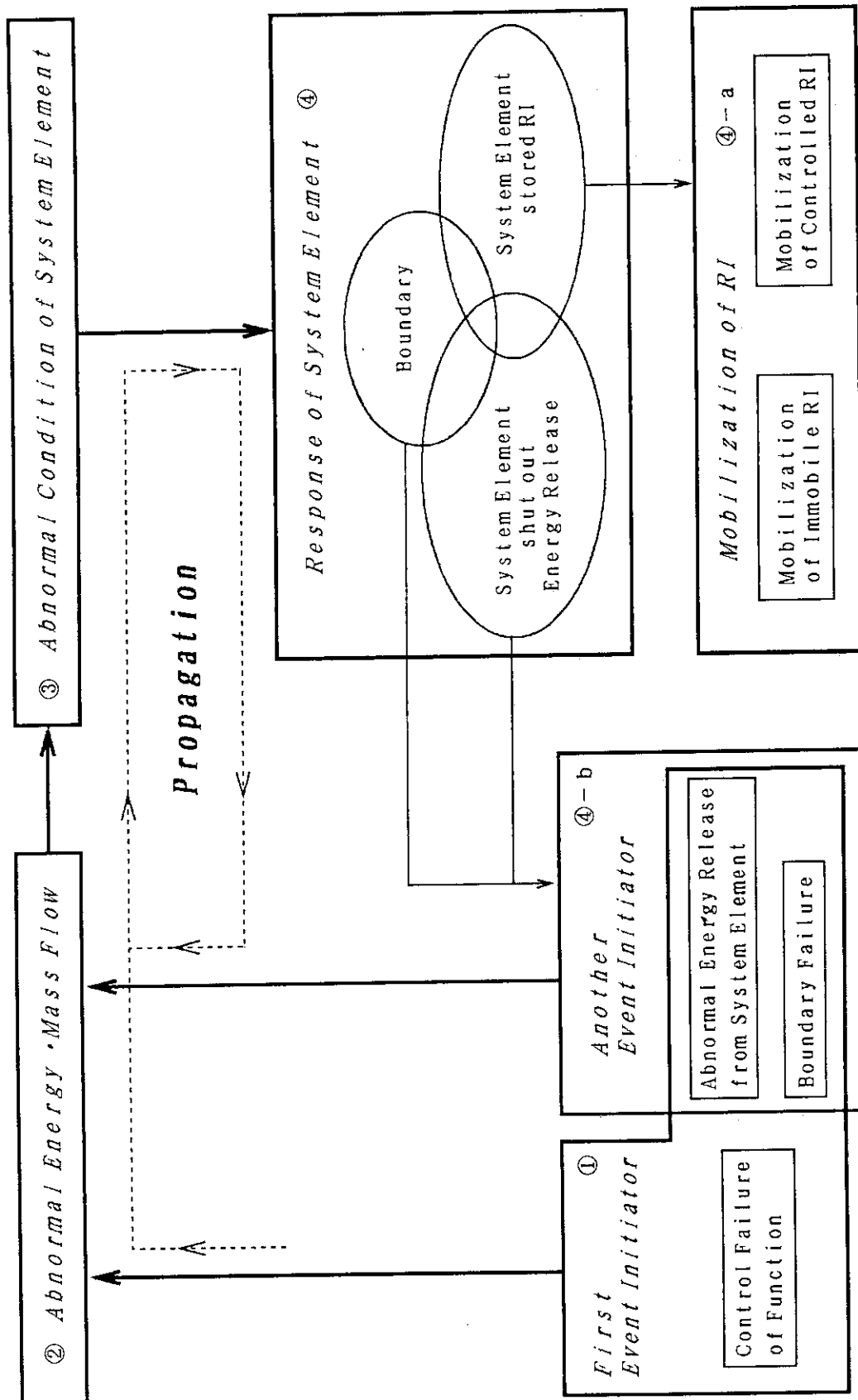


Fig. 3-1 B Pattern of Event Propagation in System Model

異常状態に対する応答を示すものがある。つまり、R I の移動化（R I 保持要素）、物質バウンダリの破損、エネルギー異常解放の発生等である。

#### ④-a R I の移動化

システム構成要素のうち、R I を保持する要素では、システム構成要素の異常状態に対する応答として、制御性R Iあるいは難移動性R Iの移動化が考えられる。これにより、システム内部のソースタームの増加が起こり、事象がより苛酷な段階に達することになる。

#### ④-b 新たな異常起因の発生

システム構成要素のうち、物質バウンダリ、空間、機能内部物質は、システム構成要素の異常状態に対する応答として、事象の進展上において、初期異常起因とは別の物質バウンダリ破損やエネルギー異常解放などの異常起因を発生させる。従って、システム構成要素の状態異常とその応答から次のステップの物理現象が発生していくことになる。

ここで、①の初期異常起因と④-bの異常起因を比べると、④-bの異常起因には、機能の制御異常は考えていない。初期異常起因以降の異常起因である物質バウンダリの破損と機能内部エネルギーの異常解放はそれぞれ、物質バウンダリ、機能内部エネルギーバウンダリ、機能内部物質の状態変化に影響するとした。

の①～④のプロセスが、①→②→③→④-b→②'→③'→④-b' ……と繰り返すことによって、様々な物理現象が発生していき、このプロセスと④-aにより、ソースタームとリークパスの形成が進んで、事象がより苛酷な段階に進展していくことになる。

そこで、このことを踏まえて Table 3-1～3-6にプロセス ①～④をまとめた。つまり、プロセス①あるいは④-bを「原因 (Cause)」とし、プロセス②を「異常フロー」、③を「異常事象 (Abnormal Event)」と表現し、プロセス④については「システムエレメントの応答」の項目にまとめている。

ここではまず、真空エリアについてTable 3-1を示す。表の中のフローは、各システム構成要素に形成されるエネルギー・物質フローを表した図で用いたフローを表す添字 (EM、RD、TH、ME、CH、M、E n) + 番号と一致している。

また、表の Response of System elementsで用いられている略字は以下のものを表す。

BF : 物質バウンダリの破損 (Boundary Failure)

MEER : 機械エネルギーの異常解放 (Mechanical Energy Release)

CHER : 化学エネルギーの異常解放 (Chemical Energy Release)

(AV) : 真空エリア (Vacuum Area)

(AF) : 燃料エリア (Fuel Area)

(AB) : ブランケットエリア (Blanket Area)

- (AC) : 冷却材エリア (Coolant Area)
- (AW) : 廃棄物エリア (Waste Area)
- (AO) : 格納エリア (Containment Area)

Table 3-1に示した真空エリアにおける異常事象は以下のものである。

Plasma Power Excursion

Plasma Disruption

Plasma Disruption with Pressure Increase

Heat Load Transient due to Plasma Heating Function

Plasma Disruption with High Temperature Gas Inleakage

Plasma Disruption with Coolant Inleakage

Plasma Disruption with Air Inleakage

本報告では異常事象の摘出で作業を止めているが、以降の作業では数学モデルの作成を行い、これらの異常事象についてまず解析を行う。そして、その結果より異常事象を縮約して「起因事象」を選定し、起因事象から事象進展解析を行っていく予定である。

Table 3-1 Abnormal Events in the Vacuum Area related System Element

Abnormal Event : Abnormal Condition of System elements	Cause : Abnormal Event Initiator	Abnormal Flows : Mass and/or Energy Flows induced by Causes	Response of System elements			
			Influenced Elements	Effect on RI Controllability	Possible Next Event Initiator	Induced Abnormal Conditions
Plasma Power Excursion	1. Control Failure of Plasma Heating Function 2. Control Failure of Fuel Supply Function	Cause 1 = TH1 Flow Cause 2 = En1 Flow → Induced Abnormal Flows RD1~6 TH2~4 M1~4	Plasma	M, RI (in Plasma)	—	(AV) Plasma Disruption
			Breeder Neu. Multiplier	Mobilization of I. RI = M14	—	(AB) Temperature-Pressure Increase
			VB Boundary	Mobilization of I. RI = M7, M17	VB Boundary Failure (=VB BF) → En6	(AV) High Temp. Gas Inleakage (AB) Loss of High Temp. Gas
Plasma Disruption	1. Control Failure of Magnetic Field Generation Function	Cause 1 = EM1 Flow	VC Boundary	Mobilization of I. RI = M6	—	(AC) Temp. - Press. Increase
			V0 Boundary	Mobilization of I. RI = M5	VC-BF → En5	(AV) Coolant Inleakage (AC) Loss of Coolant
			VB Boundary	Mobilization of I. RI = M7, M17	V0-BF → En4 VB-BF → En6	(AV) Air Inleakage (AO) Hydrogen Release (AV) High Temp. Gas Inleakage (AB) Loss of High Temp. Gas

Table 3-1 Contd.

Abnormal Event	Cause	Abnormal Flows	Response of System elements			
			VC Boundary	Mobilization of I. RI = M6	VC-BF →En5	(AV) Coolant Inleakage (AC) Loss of Coolant
( Plasma Disruption )	2. Control Failure of Plasma Heating Function	Cause 2 = TH1 Flow Cause 3 = En2 Flow Cause 4 = En1 Flow Cause 5 = En2 or En3	V0 Boundary	Mobilization of I. RI = M5	V0-BF →En4	(AV) Air Inleakage (AO) Hydrogen Release
	4. Control Failure of Fuel Supply Function	→Induced Abnormal Flows EM1~21 TH2~4	SU-IMEB	—	SU-MEER→En8, 10 (by SU-IMEBF)	(AV) Pressure Increase (AF) Pressure Increase
	5. VF or FV Boundary Failure		FG-IMEB	—	FG-MEER→En9 (by FG-IMEBF)	(AO) Pressure Increase
	1. Mechanical Energy Release from Particle Exhausting Function 2. Mechanical Energy Release from Fuel Supply Function 3. VF or FV Boundary Failure by Pressure Increase (AF)	Cause 1 = En7 Flow Cause 2 = En8 Flow Cause 3 and 4 = En2 or En3	VB Boundary	Mobilization of I. RI = M7, M17	VB-BF →En6	(AV) High Temp. Gas Inleakage (AB) Loss of High Temp. Gas
			VC Boundary	Mobilization of I. RI = M6	VC-BF →En5	(AV) Coolant Inleakage (AC) Loss of Coolant
		V0 Boundary	Mobilization of I. RI = M5	V0-BF →En4	(AV) Air Inleakage (AO) Pressure Increase (AO) Hydrogen Release	



Table 3-1 Contd.

Abnormal Event		Cause	Abnormal Flows	Response of System elements			
Plasma Disruption with Pressure Increase	4. VF or FV Boundary Failure by Temperature - Pressure Increase	→ Induced Abnormal Flows ME1~6 ----- EM1~21 TH2~4 Induced by Plasma Disruption	VF or FV Boundary	—	VF or FV -BF (except C. 3, 4) →En2 or En3	(AF) Pressure Increase	
			EX-IMEB	Mobilization of C. RI = M8	EX-MEER→En7, 11 (except Cause 1)	(AF) Pressure Increase	
			SU-IMEB	—	SU-MEER→En8, 10 (except Cause 2)	(AF) Pressure Increase	
			FG-IMEB	—	FG-MEER →En9	(AO) Pressure Increase	
Heat Load Transient due to Plasma Heating Function	Thermal Energy Release from Plasma Heating Function	Cause and Induced Abnormal Flows = TH1, 9, 13, 18	VB Boundary	Mobilization of I. RI = M7, M17	VB-BF →En6	(AV) High Temp. Gas Inleakage (AB) Loss of High Temp. Gas	
			VC Boundary	Mobilization of I. RI = M6	VC-BF →En5	(AV) Coolant Inleakage (AC) Loss of Coolant	
			V0 Boundary	Mobilization of I. RI = M5	V0-BF →En4	(AV) Air Inleakage (AO) Hydrogen Release	

Table 3-1 Contd.

Abnormal Event	Cause	Abnormal Flows	Response of System elements			
			AV Space	Move of M. RI	Temp. -Press. Increase	
Plasma Disruption with High Temperature Gas Inleakage	VB Boundary Failure	Cause = En6 Flow  → Induced Abnormal Flows ME1~6 TH5~8 ----- EM1~21 TH2~4 ( Induced by Plasma Disruption	AB Space	Move of M. RI	(AV) Temp. -Press. Increase	
			VB Boundary	Mobilization of I. RI = M7, M17	(AB) Loss of High Temp. Gas	
			VC Boundary	Mobilization of I. RI = M6		(AV) Coolant Inleakage (AC) Loss of Coolant
			VO Boundary	Mobilization of I. RI = M5	VC-BF →En5	(AV) Air Inleakage (AO) Hydrogen Release
			VF or FV Boundary		VO-BF →En4	(AF) High Temp. Gas Inleakage
			EX-IMEB	Mobilization of C. RI = M8	VF or FV -BF →En2 or En3	(AV) Pressure Increase (AF) Pressure Increase
			SU-IMEB		EX-MEER →En7, 11	(AV) Pressure Increase (AF) Pressure Increase
			FG-IMEB		SU-MEER →En8, 10	(AV) Pressure Increase (AF) Pressure Increase
						FG-MEER →En9

Table 3-1 Contd.

Abnormal Event	Cause	Abnormal Flows	Response of System elements			
			AC Space	Move of M. RI	—	(AC) Loss of Coolant
Plasma Disruption with Coolant Inleakage	VC Boundary Failure	Cause = En5 Flow  → Induced Abnormal Flows ME1~6 TH5~8 ----- FM1~2I TH2~4 [ Induced by Plasma Disruption ]	AV Space	Move of M. RI	—	(AV) Temp. -Press. Increase
			VB Boundary	Mobilization of I. RI = M7, M17	VB-BF →En6	(AV) High Temp. Gas Inleak. (AB) Loss of High Temp. Gas
					VB-CHER →CH3	(AV) Temp. -Press. Increase
			VC Boundary	Mobilization of I. RI = M6	VC-CHER →CH2	(AV) Temp. -Press. Increase
			VO Boundary	Mobilization of I. RI = M5	VO-BF →En4	(AV) Air Inleakage (AO) Hydrogen Release
					VO-CHER →CH1	(AV) Temp. -Press. Increase
			VF or FV Bound.	—	VF or FV -BF	(AF) Coolant Inleakage
			EX-IMEB	Mobilization of C. RI = M8	EX-MEER →En7, 11	(AV) Pressure Increase (AF) Pressure Increase
			SU-IMEB	—	SU-MEER →En8, 10	(AV) Pressure Increase (AF) Pressure Increase
			FG-IMEB	—	FG-MEER →En9	(AO) Pressure Increase

Table 3-1 Contd.

Abnormal Event	Cause	Abnormal Flows	Response of System elements			
			AC Space	Move of M. RI (AV)		
Plasma Disruption with Air Inleakage	VO Boundary Failure	Cause = En4 Flow  → Induced Abnormal Flows ME1~6 ----- EM1~21 TH2~4 Induced by Plasma Disruption	AV Space	Move of M. RI (AV)	Space-CHER	(AV) Temp. -Press. Increase
			VB Boundary	Mobilization of I. RI = M7, M17	VB-BF →En6	(AV) High Temp. Gas Inleak. (AB) Loss of High Temp. Gas
			VC Boundary	Mobilization of I. RI = M6	VC-BF →En5	(AV) Temp. -Press. Increase
			VO Boundary	Mobilization of I. RI = M5	VO-CHER →CH1	(AV) Temp. -Press. Increase
			VF or FV Bound.		VF or FV -BF	(AF) Air Inleakage
			EX-IMEB	Mobilization of C. RI = M8	EX-MEER →En7, 11	(AV) Pressure Increase (AF) Pressure Increase
			SU-IMEB		SU-MEER →En8, 10	(AV) Pressure Increase (AF) Pressure Increase
			FG-IMEB		FG-MEER →En9	(AO) Pressure Increase
			AC Space			(AO) Hydrogen Release
			AV Space			(AV) Temp. -Press. Increase

## Notation of Table 3-1~3-6

Areas

AV	Vacuum Area
AF	Fuel Area
AW	Waste Area
AB	Blanket Area
AC	Coolant Area
AO	Containment Area

Boundaries

See Notation of Fig.2-1

Event Initiator

BF	Boundary Failure
EMER	ElectroMagnetic Energy Release
MEER	MEchanical Energy Release
THER	THERmal Energy Release
CHER	CHemical Energy Release

Functions

FG	magnetic Field Generation function
HE	plasma HEating function
EX	particle EXhausting function
SU	fuel SUPply function
SP	fuel Separation and Purification function
ST	fuel STorage function
WST	Waste STorage function

RI

M.RI	Mobile RI
C.RI	Controlled RI
I.RI	Immobile RI



これによると、異常の進展において、真空エリア内の「守るべき」アイテムである「R I 制御性」は、物質バウンダリ (F O) や粒子排気機能内部機械エネルギーバウンダリ (EX-IMEB)、燃料精製分離機能内部機械エネルギーバウンダリ (SP-IMEB)、燃料貯蔵機能内部燃料貯蔵物質の状態異常により損なわれる可能性がある (R I の移動化)。また、「バウンダリ健全性」についても、物質バウンダリやエリア空間の状態異常により損なわれる可能性がある (物質バウンダリ破損)。

さらに、SP-IMEB、SU-IMEBの状態異常による破損や燃料精製分離機能内部化学反応性物質や燃料貯蔵物質の異常化学反応によって新たな異常エネルギーフローを形成する可能性がある (エネルギーの異常解放)。

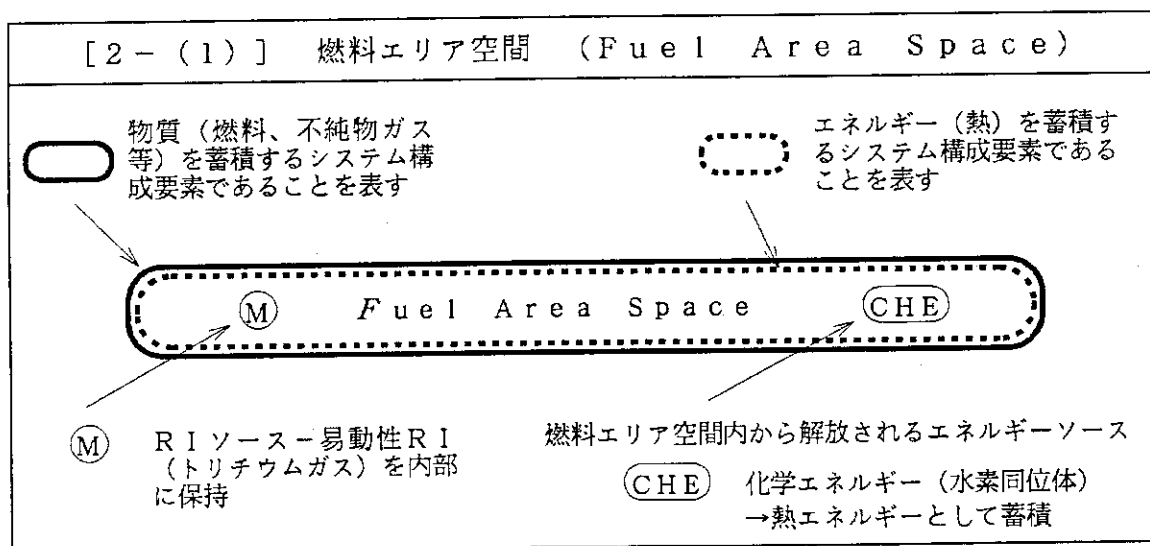
以下に各システム構成要素に関連のあるエネルギー・物質フローをまとめる。

### 2-(1) 燃料エリア空間

燃料エリア空間は燃料エリア物質バウンダリによって閉じられている空間であり、燃料サイクルのプロセス移送に用いられる。

この空間は内部に易動性 R I (トリチウムガス) を保持しており、物質バウンダリの破損による空気の流入が起こると、内部に含まれている水素同位体が条件によっては燃焼反応を起こし、化学エネルギーソースが解放されることになる。また、この空間は熱エネルギーを蓄積するシステム構成要素であり、蓄積量によっては温度あるいは圧力上昇による燃料バウンダリ破損を招く可能性がある (Table 3.2-(1) 参照)。そこで、事象の進展に影響を与える真空エリア空間の状態変化を解析するために、燃料エリア空間に関連のある物質 (含 R I) フローとエネルギーフローを明確にする必要がある。

Table 3.2-(1) Symbols of Fuel Area Space in the system model



そこで、燃料エリア空間と他のシステム構成要素との間の通常・異常時のフローを以下

にまとめた (Fig. 3.2-(1) 参照)。

熱エネルギーフローは、燃料エリア空間に関連するものは、エリア空間と燃料供給機能内部機械エネルギーバウンダリ (SU-IMEB)、燃料精製分離機能内部化学反応性物質、内部機械エネルギーバウンダリ (SP-IMEB)、燃料貯蔵機能内部燃料貯蔵物質、物質バウンダリ FO との間に、TH25, 28, 30, 32, 33 が形成されている。

機械エネルギーフローとしては、SU-IMEB、SP-IMEB、FV、VF、BF、FW、FO のエネルギーあるいは物質バウンダリへの圧力負荷として、ME15, 19, 17, 18, 22, 24, 25 が形成されている。

化学エネルギーフローは、まず空間内部の化学エネルギーソース (水素同位体) は燃焼反応により熱エネルギーとしてそのまま内部に蓄積される。機能内部物質の化学反応により物質フローを伴って CH4, 5 を形成する。

物質フローは、SU-IMEB、SP-IMEB、燃料貯蔵物質、FO 物質バウンダリ燃料エリア側面と燃料エリア空間との間に形成されている (M9~12)。

エネルギーを伴う物質フローは、通常運転時には、プラズマ、真空エリア空間、ブランケットエリア空間、廃棄物エリア空間との間に定常のフロー (En1, 2, 13, 14) が形成されている。異常時には、内部エネルギーバウンダリ (SU-IMEB、EX-IMEB、SP-IMEB) の破損による異常フロー En10, 11, 12 が形成され、また、物質バウンダリ (FV、VF、BF、FW、FO) の破損によって En3, 2, 13, 14, 15 が形成される。

このように、燃料エリア空間は事象シーケンス上で、制御機能、物質バウンダリ (VF、FV、VO、VC、VB) 健全性、機能内部エネルギーバウンダリ健全性の有無等によって形成されるフローが変化する。

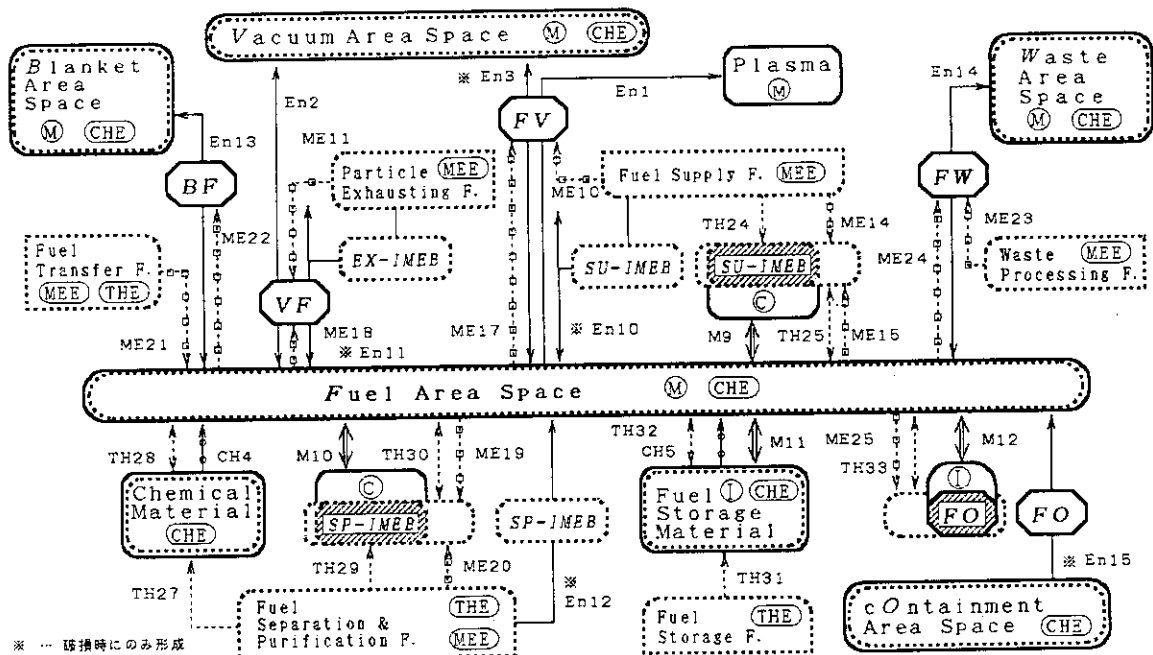


Fig. 3.2-(1) Mass and Energy Flows related to Fuel Area Space



以下に、燃料エリア空間に関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめる。

・熱エネルギーフロー

- TH25 燃料エリア空間とSU-IMEBとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH28 燃料エリア空間と化学反応性物質との間に形成される熱伝達によるフロー
- TH30 燃料エリア空間とSP-IMEBとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH32 燃料エリア空間と燃料貯蔵物質との間に形成される熱伝達によるフロー
- TH33 燃料エリア空間とFOとの間に形成される熱伝達によるフロー

・機械エネルギーフロー

- ME15 燃料エリア空間のSU-IMEBへの圧力負荷を表すフロー
- ME17 燃料エリア空間のFVへの圧力負荷を表すフロー
- ME18 燃料エリア空間のVFへの圧力負荷を表すフロー
- ME19 燃料エリア空間のSP-IMEBへの圧力負荷を表すフロー
- ME22 燃料エリア空間のBFへの圧力負荷を表すフロー
- ME24 燃料エリア空間のFWへの圧力負荷を表すフロー
- ME25 燃料エリア空間のFOへの圧力負荷を表すフロー

・物質フロー

- M9 SU-IMEBとの間の吸着／脱離現象によるフロー
- M10 SP-IMEBとの間の吸着／脱離現象によるフロー
- M11 燃料貯蔵物質との間の吸収／脱離現象によるフロー
- M12 FOとの間の吸収／脱離現象によるフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

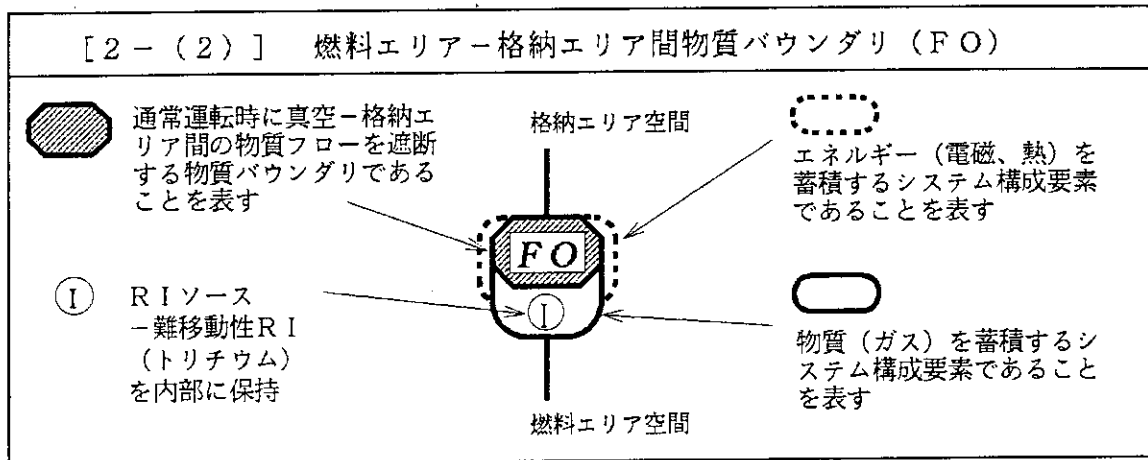
- En1 燃料供給機能の制御によるプラズマへの供給燃料のフロー
- En2 (通常運転時) 粒子排気機能の制御による排気粒子のフロー  
(VF破損時) 燃料エリア-真空エリア空間間の物質移動によるフロー
- En3 FV破損時の燃料エリア空間-真空エリア空間間の物質移動によるフロー
- En10 SU-IMEB破損時に放出される物質の燃料エリア空間流入分によるフロー
- En11 EX-IMEB破損時に放出される物質の燃料エリア空間流入分によるフロー
- En12 SP-IMEB破損時に放出される物質の燃料エリア空間への流入によるフロー
- En13 (通常運転時) 燃料輸送機能の制御による輸送粒子のフロー  
(BF破損時) ブランケットエリア-燃料エリア空間間の物質移動によるフロー
- En14 (通常運転時) 廃棄物処理機能の制御による輸送粒子のフロー  
(FW破損時) 燃料エリア-廃棄物エリア空間間の物質移動によるフロー
- En15 FO破損時の燃料エリア-格納エリア空間間の物質移動によるフロー

2-(2) FOバウンダリ (燃料-格納エリア間物質バウンダリ)

FOバウンダリは燃料エリア空間と格納エリア空間との間の物質境界であり、通常時には両空間の物質フローを遮断している。

FOは、燃料エリア側面に難移動性RI (吸蔵トリチウム等) を保持しており、バウンダリの温度上昇等によって移動化する可能性がある。また、エネルギーに関しては、熱エネルギーを蓄積するシステム構成要素であると考え、蓄積変化は、FO温度の状態変数の変化によって判る (Table 3.2-(2)参照)。

Table 3.2-(2) Symbols of FO Boundary in the system model



このバウンダリの状態異常によっては、難移動性RIの移動化 (=RI制御性の喪失) あるいはFOバウンダリ破損 (=バウンダリ健全性の喪失) が起こる。従って、FOバウンダリの状態変化に影響するエネルギー・物質 (含RI) フローについて以下に述べることにする (Fig. 3.2-(2) 参照)。

熱エネルギーフローとしては、常に形成されている熱エネルギーフローとして、エリア空間 (燃料、格納) との間の熱伝達によるもの (TH33, 34)。

機械エネルギーフローは、FOバウンダリ健全時に、エリア空間 (燃料、格納) の圧力負荷によるものを考える (ME25, 26)。

物質フローとしては、燃料エリア空間との間の吸収/脱離現象によるものが考えられる (M12)。

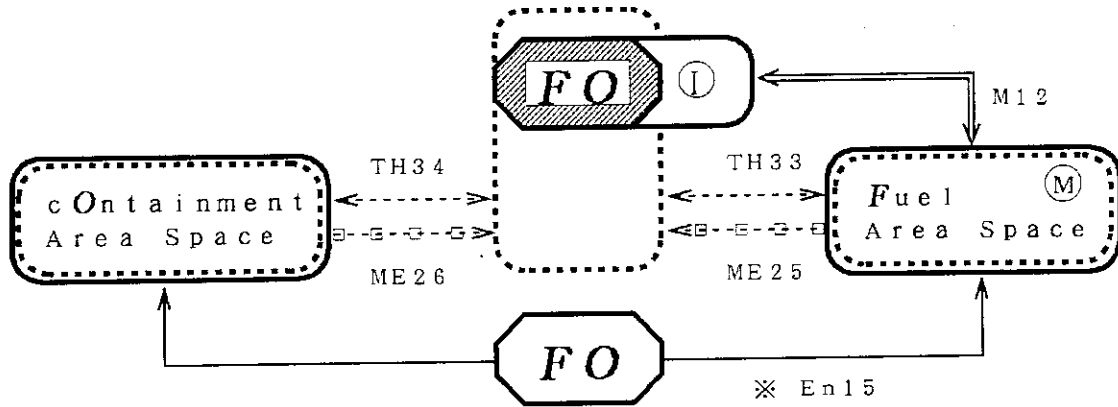
エネルギーを伴う物質フローとしては、FOバウンダリ破損時にFOバウンダリを通じて燃料エリア空間と格納エリア空間との間の物質移動によるフローがFOに関連するフローとして考えられる (En15)。

FOバウンダリが保持している難移動性RIは、バウンダリの状態異常 (温度) と燃料エリア空間の状態異常 (温度、圧力) に起因するトリチウムの脱離等により移動化する。

また、FOバウンダリは、バウンダリの状態異常に起因した熱的な影響 (温度上昇) や機械的な影響 (熱応力・燃料エリア空間圧力・格納エリア空間圧力等による応力増大) が

限界を越えた場合にバウンダリ破損を起こし、リークパスを形成する。

このようにFOバウンダリは事象シーケンス上で、他のシステム構成要素との間のフローの変化によりRIの移動化やFOバウンダリ破損を起こし、さらにフローを変化させる。



※ ... 破損時のみ形成

Fig. 3. 2- (2) Mass and Energy Flows related to FO Boundary

これらのFOバウンダリに関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下のようなになる。

・ 熱エネルギーフロー

TH33 FOと燃料エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー

TH34 FOと格納エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー

・ 機械エネルギーフロー

ME25 FOへの燃料エリア空間の圧力負荷を表すフロー

ME26 FOへの格納エリア空間の圧力負荷を表すフロー

・ 物質フロー

M12 燃料エリア空間との間の吸収／脱離現象によるフロー

・ エネルギーを伴う物質フロー

En15 FO破損時の燃料エリア空間－格納エリア空間間の物質移動によるフロー

2-(3) BFバウンダリ (ブランケット－燃料エリア間物質バウンダリ)

BFバウンダリは燃料エリア空間とブランケットエリア空間との間の物質境界としてのみ存在する構成要素である。通常時には、燃料輸送機能による制御によって、ブランケットエリア空間と燃料エリア空間にエネルギーを伴う物質(含RI)フローを形成している。

BFバウンダリは、物質もエネルギーも蓄積するシステム構成要素ではなく、BFバウ

ンダリそのものの状態変化を追う必要はない (Table 3.2-(3) 参照)。しかしながら、ブランケットエリア空間と燃料エリア空間の状態異常によるBFバウンダリ破損をシーケンス上で考え、その破損により形成される新たなエネルギー・物質フローから事象の進展を追う必要がある。

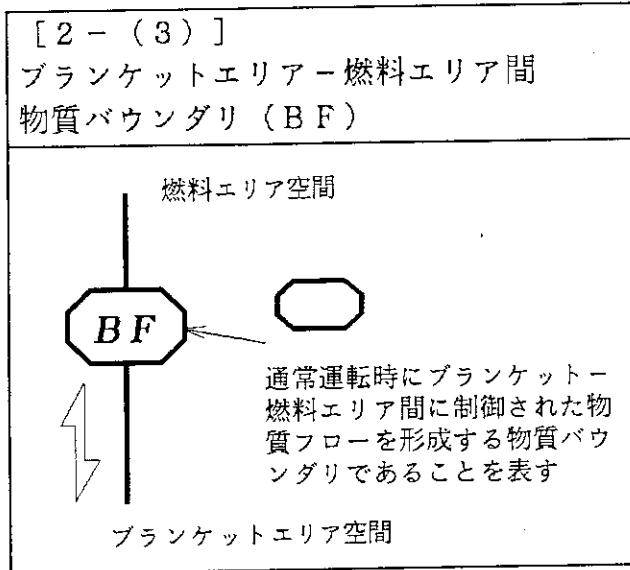


Table 3.2-(3)  
 Symbols of BF Boundary  
 in the system model

BFバウンダリに関連しているエネルギー・物質フローには、以下のようなフローが考えられる (Fig. 3.2-(3) 参照)。

燃料輸送機能作動時には、燃料輸送機能制御部の機械エネルギー・熱エネルギー制御フロー (TH35, ME21) の作用

によって、ブランケット→燃料エリア空間方向と燃料→ブランケット方向の双方向にエネルギーを伴う物質フローが形成される (En13)。また、エリア空間 (ブランケット、燃料) の圧力負荷によるフローを考える (ME22, 27)。

また、BFバウンダリ破損時には、エネルギーを伴う物質 (含むRI) フローが形成される (En13)。このフローはブランケット・燃料両エリア空間の圧力差や各粒子の濃度差などによる物質移動であり、両エリアの状態によって、そのフローの向きや流量が変化する。

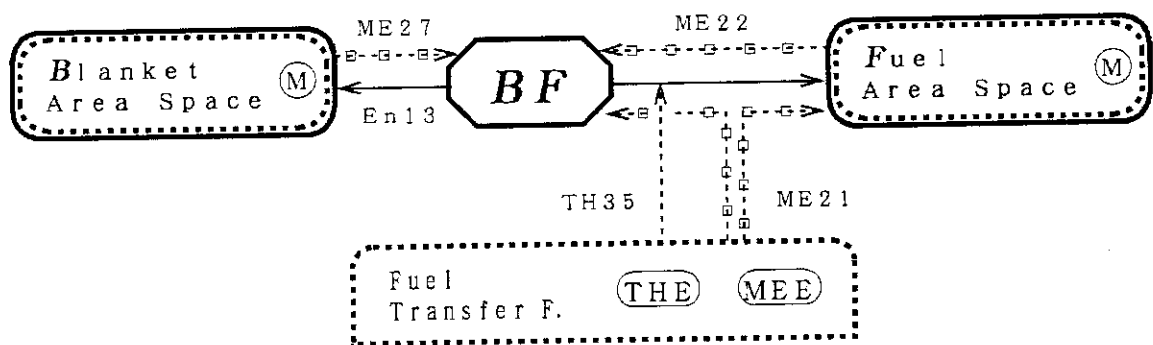


Fig. 3.2-(3) Mass and Energy Flows related to BF Boundary

BFバウンダリに関連するエネルギー・物質フローを改めて以下のようにまとめる。

・熱エネルギーフロー

TH35 燃料輸送機能の制御による冷却あるいは加熱フロー

・機械エネルギーフロー

- ME21 通常運転時のEn13フロー（燃料輸送）を制御する燃料輸送機能によるフロー
- ME22 B Fへの燃料エリア空間の圧力負荷を表すフロー
- ME27 B Fへのブランケットエリア空間の圧力負荷を表すフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

- En13 （通常運転時）燃料輸送機能の制御による輸送粒子のフロー  
（B F破損時）ブランケットエリアー燃料エリア空間間の物質移動によるフロー

2-(4) F Wバウンダリ（燃料ー廃棄物エリア間物質バウンダリ）

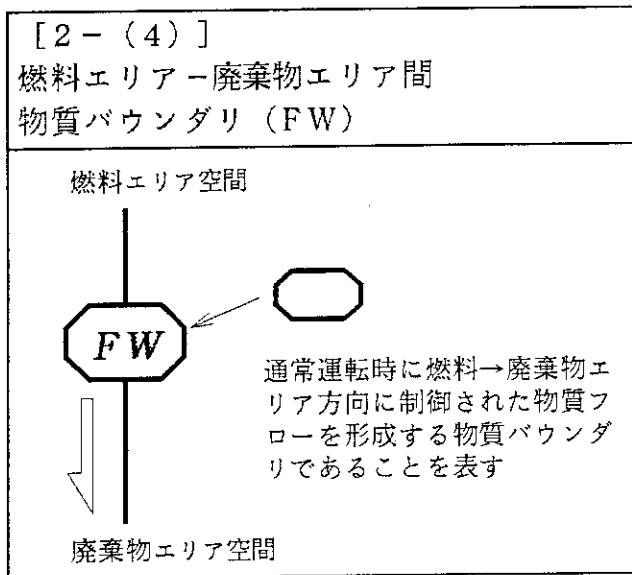


Table 3.2-(4)  
Symbols of FW Boundary  
in the system model

F Wバウンダリは燃料エリア空間と廃棄物エリア空間との間の物質境界としてのみ存在する構成要素である。通常時には、廃棄物処理機能による制御によって、燃料エリア空間と廃棄物エリア空間にエネルギーを伴う廃棄物質（含R I）フローを形成している。

F Wバウンダリは、物質もエネルギーも蓄積するシステム構成要素ではなく、F Wバウンダリそのものの状態変化を追う必要はない（Table 3.2-(4) 参照）。しかしながら、燃料エリア空間と廃棄物エリア空間の状態異常によるF Wバウンダリ破損をシーケンス上で考え、その破損により形成される新たなエネルギー・物質フローから事象の進展を追う必要がある。

F Wバウンダリに関連しているエネルギー・物質フローには以下のようなフローが考えられる（Fig.3.2-(4) 参照）。

廃棄物処理機能作動時には、廃棄物処理機能制御部の機械エネルギーによる制御フローの作用で（ME23）、燃料→廃棄物エリア空間方向にエネルギーを伴う物質フローが形成される（En14）。また、エリア空間（燃料、廃棄物）の圧力負荷によるフローが形成されると考える（ME24, 28）。

また、F Wバウンダリ破損時には、エネルギーを伴う物質（含むR I）フローが形成される（En14）。このフローは燃料・廃棄物両エリア空間の圧力差や各粒子の濃度差などによる物質移動であり、両エリアの状態によって、そのフローの向きや流量が変化する。

F Wバウンダリに関連するエネルギー・物質フローを改めて以下のようにまとめる。

・機械エネルギーフロー

- ME23 通常運転時のEn14フロー（廃棄物輸送）を制御する廃棄物処理機能によるフロー  
 ME24 FWへの燃料エリア空間の圧力負荷を表すフロー  
 ME28 FWへの廃棄物エリア空間の圧力負荷を表すフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

- En14 （通常運転時）廃棄物処理機能の制御による輸送粒子のフロー  
 （BF破損時）燃料エリアー廃棄物エリア空間間の物質移動によるフロー

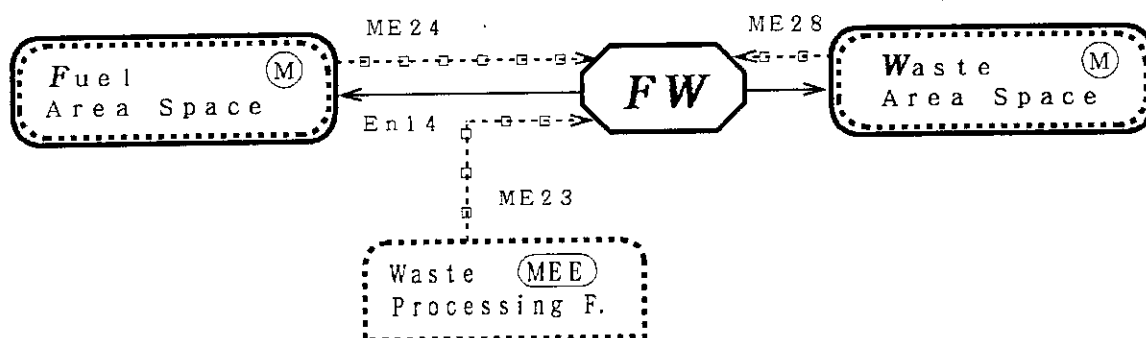


Fig. 3. 2-(4) Mass and Energy Flows related to FW Boundary

2-(5) 燃料精製分離機能

燃料精製分離機能は、粒子排気機能あるいは燃料輸送機能によりVF、BFより燃料エリアに流入してきた燃料物質と不純物の混合物質を精製・分離する機能である。本機能は、燃料精製分離機能制御部、機能内部化学反応性物質、機能内部機械エネルギーバウンダリ（SP-IMEB）に分解される（Table 3. 2-(5)参照）。

燃料精製分離機能に関連しているエネルギー・物質フローには以下のようなフローが考えられる（Fig. 3. 2-(5)参照）。

熱エネルギーフローとしては、燃料精製分離機能制御部による温度制御が化学反応性物質とSP-IMEBに形成されている（TH27, 29）。また、燃料エリア空間との熱伝達によるフローが化学反応性物質とSP-IMEBに常時形成されている（TH28, 30）。

機械エネルギーフローは、SP-IMEBへの燃料エリア空間と機能制御部内の冷凍材の圧力負荷によるものが考えられる（ME19, 20）。

物質フローは、SP-IMEBの蓄積熱エネルギー量や燃料エリア空間内圧力の変化によるSP-IMEB表面の吸着/脱離現象（含RI）によるものが考えられる（M10）。化学反応性物質の物質（含RI）蓄積は無視し、従って物質フローも考えないことにする。

化学エネルギーフローは、異常化学反応（燃焼反応）によるフローを化学反応性物質より燃料エリア空間内に考える（CH4）。

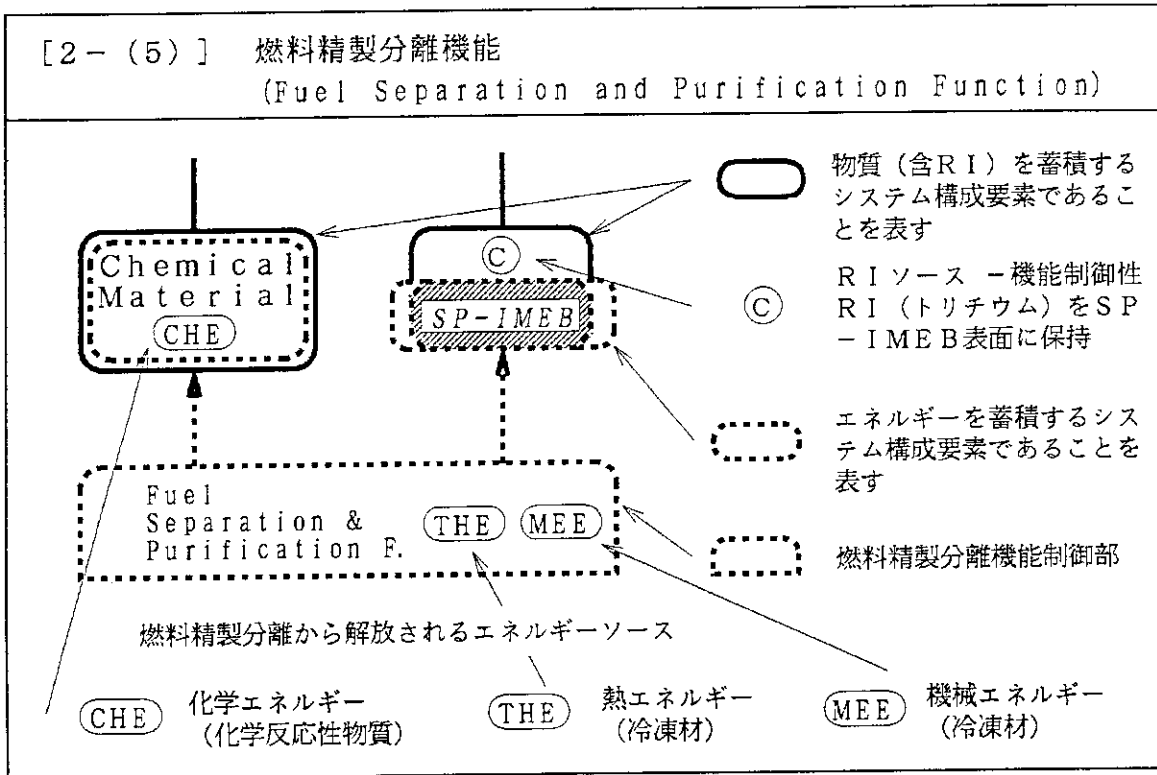
冷凍材のエンタルピーによるエネルギーは、通常時には他のシステムへのフローがSP

- I M E B によって遮断されている。しかし、この機能内部エネルギーバウンダリは、機能制御部・燃料エリア空間との間の熱エネルギーフロー (TH25, 26)、燃料エリア空間と冷凍材の圧力負荷による機械エネルギーフロー (ME19, 20)のフロー量異常による蓄積エネルギー異常から、内部エネルギーバウンダリ SP-I M E B 破損が起こると、燃料エリア空間へ冷凍材放出・膨張が起こり、エネルギー (主に機械エネルギー) を伴う物質 (R I を含まない) フロー (En12) が形成される。

燃料精製分離機能は事象シーケンス上で、初期異常起因として「機能制御異常」、初期異常起因あるいは二次的な異常起因として「燃料精製分離機能内部化学反応性物質化学エネルギー異常解放」「燃料精製分離機能内部機械エネルギー異常解放」が起こることが考えられる。このうち、化学、機械エネルギー異常解放は、内部化学反応性物質や内部エネルギーバウンダリ SP-I M E B の状態異常が原因となる。

Table 3.2-(5)

Symbols of Fuel Separation and Purification Function in the system model

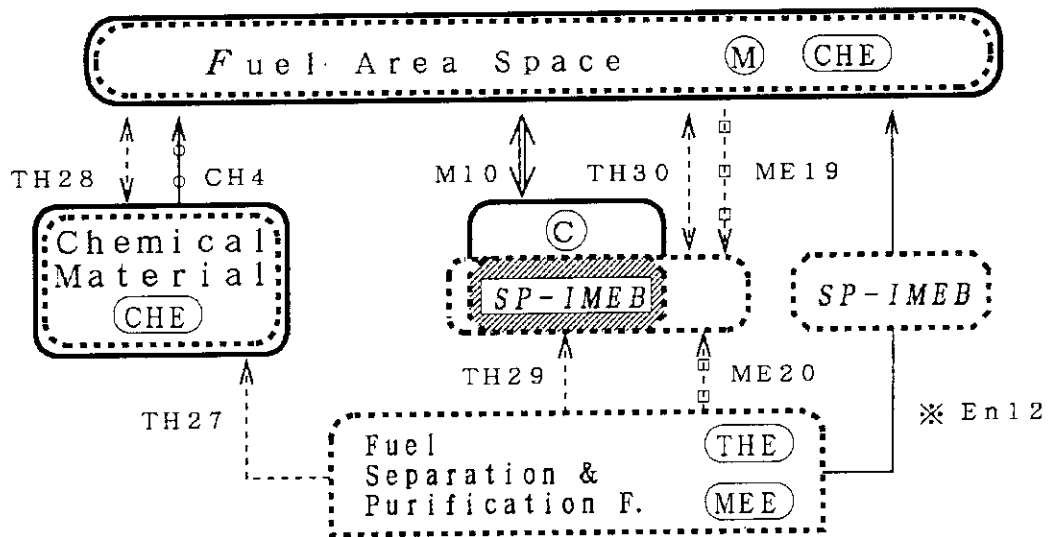


燃料精製分離機能に関連するエネルギー・物質フローを改めて以下のようにまとめる。

・熱エネルギーフロー

- TH27 機能制御部の化学反応性物質温度制御により形成されるフロー
- TH28 化学反応性物質と燃料エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー
- TH29 機能制御部の SP-I M E B 温度制御により形成されるフロー

- TH30 SP-IMEBと燃料エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー
- ・機械エネルギーフロー
  - ME19 SP-IMEBへの燃料エリア空間の圧力負荷を表すフロー
  - ME20 冷凍材圧力によるSP-IMEBへの圧力負荷を表すフロー
- ・化学エネルギーフロー
  - CH4 化学反応性物質の異常化学反応によるフロー
- ・物質フロー
  - M10 SP-IMEBと燃料エリア空間間の吸着／脱離現象によるフロー
- ・エネルギーを伴う物質フロー
  - En12 SP-IMEB破損時に燃料エリア空間に流入する流体によるフロー



※ … 破損時にのみ形成

Fig. 3. 2-(5) Mass and Energy Flows related to Fuel Separation and Purification Function

2-(6) 燃料貯蔵機能

燃料貯蔵機能は、燃料サイクル上において燃料精製分離機能によって精製分離された燃料（重水素、トリチウム）を一時貯蔵する機能である。本機能は、燃料貯蔵機能制御部、機能内部燃料貯蔵物質に分解される（Table 3.2-(6)参照）。

燃料貯蔵機能に関連しているエネルギー・物質フローには以下のようなフローが考えられる（Fig. 3.2-(6)参照）。

熱エネルギーフローとしては、燃料貯蔵機能制御部による温度制御が燃料貯蔵物質に形成されている（TH31）。また、燃料エリア空間との熱伝達によるフローが燃料貯蔵物質に常



時形成されている(TH32)。

物質フローは、燃料貯蔵物質の蓄積熱エネルギー量や燃料エリア空間内圧力の変化により燃料貯蔵物質内の吸収/脱離現象(含RI)によるものが考えられる(M11)。

化学エネルギーフローは、異常化学反応(燃焼反応)によるフローを燃料貯蔵物質より燃料エリア空間内に考える(CH5)。

燃料貯蔵機能は事象シーケンス上で、初期異常起因として「機能制御異常」、初期異常起因あるいは二次的な異常起因として「燃料貯蔵機能内部燃料貯蔵物質化学エネルギー異常解放」が起こることが考えられる。

Table 3.2-(6) Symbols of Fuel Storage Function in the system model

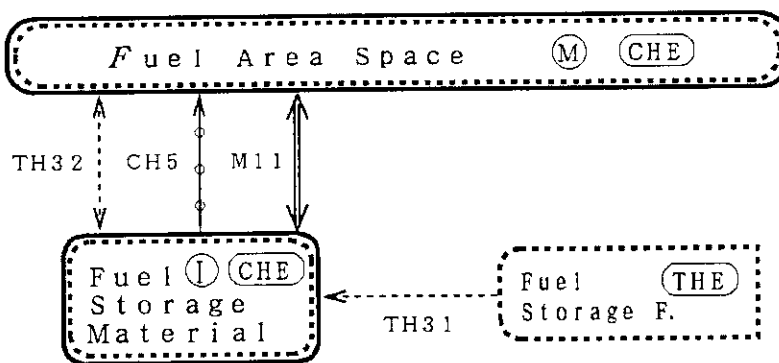
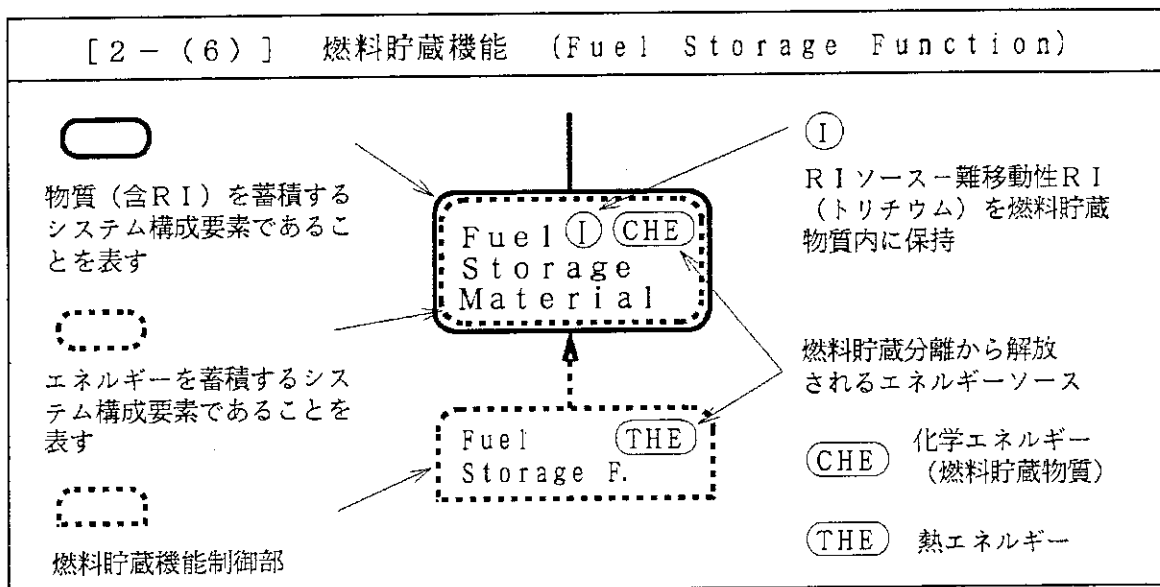


Fig. 3.2-(6) Mass and Energy Flows related to Fuel Storage Function

燃料貯蔵機能に関連するエネルギー・物質フローを改めて以下のようにまとめる。

・熱エネルギーフロー

- TH31 機能制御部の燃料貯蔵物質温度制御により形成されるフロー
- TH32 燃料貯蔵物質と燃料エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー

・化学エネルギーフロー

- CH5 燃料貯蔵物質の異常化学反応によるフロー

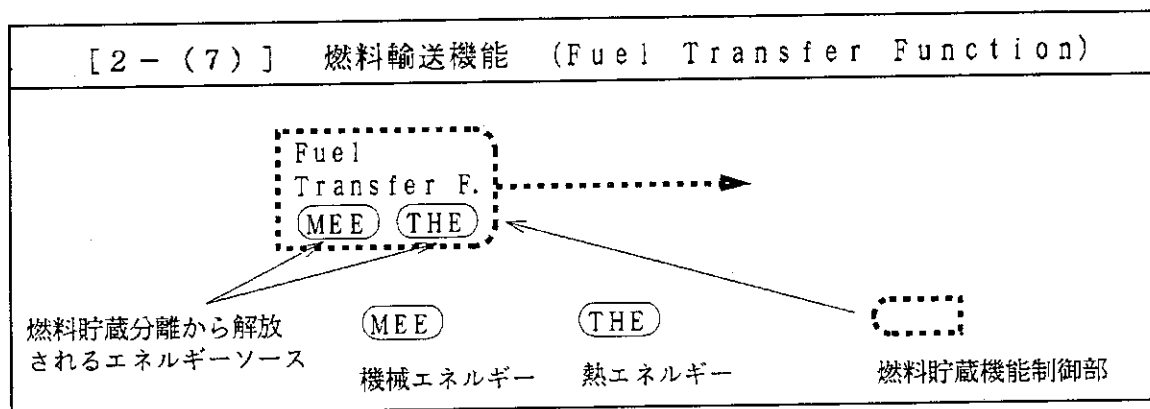
・物質フロー

- M11 燃料貯蔵物質と燃料エリア空間間の吸収／脱離現象によるフロー

2-(7) 燃料輸送機能

燃料輸送機能は、ブランケットエリア空間と燃料エリア空間に気体粒子を循環させ、ブランケットエリア空間に生成されたトリチウムを輸送する機能であり、ブランケットエリアと燃料エリアとの境界であるBFバウンダリに位置している。本機能は燃料輸送制御部内に機械エネルギーと熱エネルギーソースを内包し、これらのエネルギーによって制御を行う (Table 3.2-(7) 参照)。

Table 3.2-(7) Symbols of Fuel Transfer Function in the system model



燃料輸送機能作動時には、燃料輸送機能制御部の機械エネルギー・熱エネルギー制御フローの作用により (TH35, ME21)、ブランケットエリア空間と燃料エリア空間との間に物質を伴うエネルギーフローが形成される (En13) (Fig. 3.2-(7) 参照)。燃料輸送機能は事象シーケンス上で、初期異常起因として「機能制御異常」を考える。

燃料輸送機能に関連するエネルギー・物質フローを改めて以下のようにまとめる。

・熱エネルギーフロー

- TH35 燃料輸送機能の制御による冷却あるいは加熱フロー

・機械エネルギーフロー

- ME21 通常運転時のEn13フロー (燃料輸送) を制御する燃料輸送機能によるフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

- En13 (通常運転時) 燃料輸送機能の制御による輸送粒子のフロー
- (BF破損時) ブランケットエリア-燃料エリア空間間の物質移動によるフロー

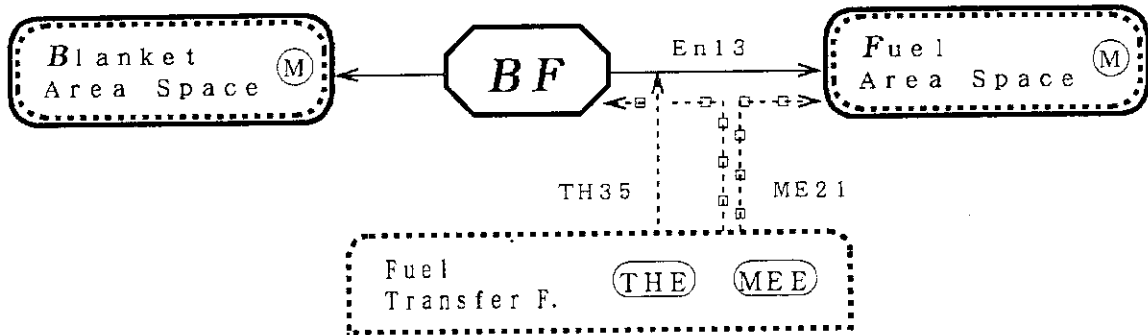
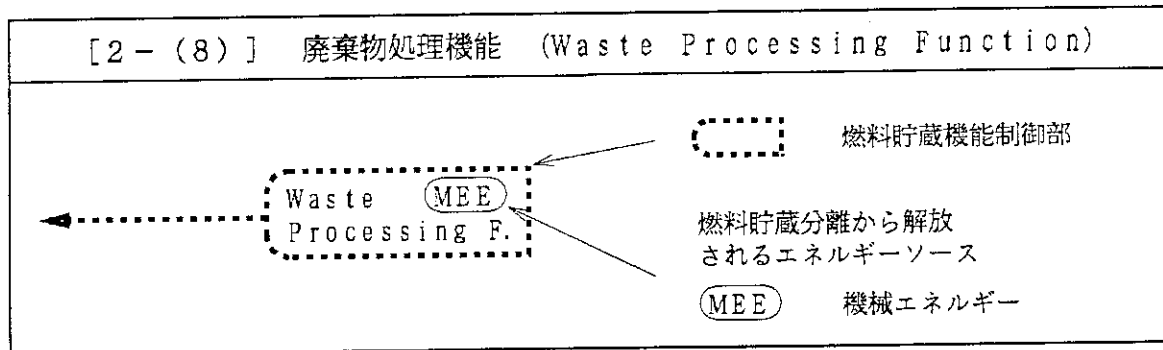


Fig. 3. 2- (7)  
Mass and Energy Flows related to Fuel Transfer Function

2-(8) 廃棄物処理機能

廃棄物処理機能は、燃料精製分離機能によって抽出された廃棄物を燃料エリア空間から廃棄物エリア空間に輸送する機能であり、燃料エリアと廃棄物エリアの境界FWに位置している。本機能は廃棄物処理機能制御部内に機械エネルギーを内包し、そのエネルギーによって制御を行う (Table 3. 2-(8) 参照)。

Table 3. 2-(8) Symbols of Waste Processing Function in the system model



廃棄物処理機能に関連しているエネルギー・物質フローには以下のようなフローが考えられる (Fig. 3. 2-(8) 参照)。

廃棄物処理機能作動時には、廃棄物処理機能制御部の機械エネルギーによる制御フローの作用で (ME23)、燃料→廃棄物エリア空間方向にエネルギーを伴う物質フローが形成される (En14)。廃棄物処理機能は事象シーケンス上で、初期異常起因として「機能制御異常」が起ることを考える。

廃棄物処理機能に関連するエネルギー・物質フローを改めて以下のようにまとめる。

・機械エネルギーフロー

ME23 通常運転時のEn14フロー（廃棄物輸送）を制御する廃棄物処理機能によるフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

En14 （通常運転時）廃棄物処理機能の制御による輸送粒子のフロー

（BF破損時）燃料エリア-廃棄物エリア空間間の物質移動によるフロー

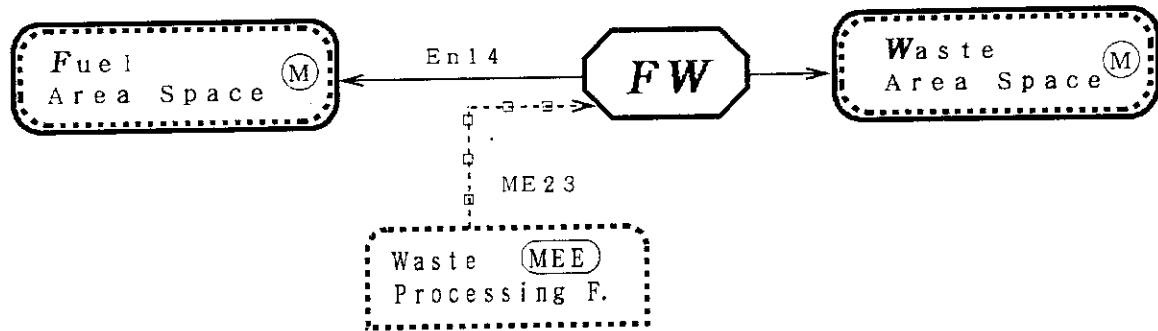


Fig. 3. 2- (8)

Mass and Energy Flows related to Waste Processing Function

3. 2. 2 燃料エリアにおける異常事象の抽出

燃料エリアにおける異常事象の抽出過程をTable 3-2に示す。Table 3-2に示した燃料エリアにおける異常事象には以下のものがある。

Temperature - Pressure Increase

Pressure Increase

High Temperature Gas Inleakage

Coolant Inleakage

Air Inleakage

Table 3-2 Abnormal Events in the Fuel Area related System Element

Abnormal Event : Abnormal Condition of System elements	Cause : Abnormal Event Initiator	Abnormal Flows : Mass and/or Energy Flows induced by Causes	Response of System elements			
			Influenced Elements	Effect on RI Controllability	Possible Next Event Initiator	Induced Abnormal Conditions
Temperature - Pressure Increase	1. Control Failure of Fuel Transfer Function 2. Control Failure of Fuel Separation & Purification Function 3. Chemical Energy Release from Chemical Material (Fuel Separation & Purification Function) 4. Control Failure of Fuel Storage Function 5. Chemical Energy Release from Fuel Storage Material (Fuel Storage Function)	Cause 1 = En13 Flow Cause 2 = TH27 or TH29 Cause 3 = CH4 Flow Cause 4 = TH31 Flow Cause 5 = CH5 Flow → Induced Abnormal Flows ME15, 17~19, 22, 24, 25 TH25, 28, 30, 32, 33	F0 Boundary	Mobilization of I. RI = M12	F0-BF →En15	(AF) Air Inleakage (AO) Pressure Increase (AO) Hydrogen Release
			VF or FV Boundary	—	VF or FV -BF →En2 or En3	(AV) Pressure Increase
			BF Boundary	—	BF-BF →En13	(AF) High Temp. Gas Inleakage (AB) Loss of High Temp. Gas
			FW Boundary	—	FW-BF →En14	(AW) Pressure Increase
			SP-IMEB	Mobilization of C. RI = M10	SP-MEER →En12	(AF) Pressure Increase
			SU-IMEB	Mobilization of C. RI = M9	SU-MEER →En8, 10	(AF) Pressure Increase (AV) Pressure Increase
			Fuel Storage Material	Mobilization of I. RI = M11	—	—

Table 3-2 Contd.

Abnormal Event	Cause	Abnormal Flows	Response of System elements			
			F0 Boundary	Mobilization of I. RI = M12	F0-BF	(AF) Air Inleakage (AO) Pressure Increase (AO) Hydrogen Release
Pressure Increase	1. Mechanical Energy Release from Plasma Exhausting Function  2. Mechanical Energy Release from Fuel Supply Function  3. Mechanical Energy Release from Fuel Separation & Purification Function  4. VF or FV Boundary Failure by Pressure Increase (AV)	Cause 1 = En11 Flow Cause 2 = En10 Flow Cause 3 = En12 Flow Cause 4 = En2 or En3  → Induced Abnormal Flows ME15, 17~19, 22, 24, 25	F0 Boundary	Mobilization of I. RI = M12	F0-BF →En15	(AF) Air Inleakage (AO) Pressure Increase (AO) Hydrogen Release
			VF or FV Boundary	—	VF or FV -BF (except Cause 4)	(AV) Pressure Increase
			BF Boundary	—	BF-BF →En13	(AF) High Temp. Gas Inleakage (AB) Loss of High Temp. Gas
			FW Boundary	—	FW-BF →En14	(AW) Pressure Increase
High Temperature Gas Inleakage	BF Boundary Failure	Cause = En13 Flow	SP-IMEB	Mobilization of C. RI = M10	SP-MEER →En12 (except Cause 3)	—
			SU-IMEB	Mobilization of C. RI = M9	SU-MEER En8, 10 (except Cause 2)	(AV) Pressure Increase
			Fuel Storage Material	Mobilization of I. RI = M11	—	—
			AF Space	Move of M. RI	—	(AF) Temp. -Press. Increase

Table 3-2 Contd.

Abnormal Event	Cause	Abnormal Flows	Response of System elements			
			AB Space	Move of M.RI		
( High Temp. Gas Inleakage )		→ Induced Abnormal Flows ME15, 17~19, 22, 24, 25 TH25, 28, 30, 32, 33	AB Space	Move of M.RI	—	(AB) Loss of High Temp. Gas
	FO Boundary		Mobilization of I.RI = M12	FO-BF →En15	(AF) Air Inleakage (AO) Hydrogen Release	
	VF or FV Boundary		—	VF or FV -BF →En2, or En3	(AV) High Temp. Gas Inleakage	
	FW Boundary		—	FW-BF →En14	(AW) High Temp. Gas Inleakage	
	SP-IMEB		Mobilization of C.RI = M10	SP-MEER →En12	(AF) Pressure Increase	
	SU-IMEB		Mobilization of C.RI = M9	SU-MEER →En8, 10	(AF) Pressure Increase (AV) Pressure Increase	
	Fuel Storage Material		Mobilization of I.RI = M11	—	—	
	AF Space		Move of M.RI	—	(AF) Temp. -Press. Increase	
	AV or AB Space		Move of M.RI	—	—	
Coolant Inleakage	I. VF or FV Boundary Failure by Coolant Increase (AV)	Cause 1 = En2 or En3 (+ En5)				

Table 3-2 Contd.

Abnormal Event		Cause	Abnormal Flows	Response of System elements				
Coolant Inleakage	2. BF Boundary Failure by Coolant Increase (AB)	Cause 2 = En13 Flow (+ En17)  → Induced Abnormal Flows ME15, 17~19, 22, 24, 25 TW25, 28, 30, 32, 33	F0 Boundary	Mobilization of I. RI = M12	F0-BF →En15	(AF) Air Inleakage (AO) Hydrogen Release		
			VF or FV Boundary	—	VF or FV -BF (except Cause 1)	(AV) Coolant Inleakage		
			FW Boundary	—	FW-BF →En14	(AW) Coolant Inleakage		
			Chemical Material	—	SP-CHER →CU4	(AF) Temp. -Press. Increase		
			Fuel Storage Material	Mobilization of I. RI = M11	ST-CHER →CH5	(AF) Temp. -Press. Increase		
			SP-IMEB	Mobilization of C. RI = M10	SP-MEER →En12	(AF) Pressure Increase		
			SU-IMEB	Mobilization of C. RI = M9	SU-MEER →En8, 10	(AF) Pressure Increase (AV) Pressure Increase		
			BF Boundary	—	BF-BF (except Cause 2) →En13	(AF) High Temp. Gas Inleakage (AB) Loss of High Temp. Gas		



Table 3-2 Contd.

Abnormal Event	Cause	Abnormal Flows	Response of System elements			
			AF Space	Move of M. RI (AF)	Space-CHER	(AF) Temp. -Press. Increase
Air Inleakage	FO Boundary Failure	Cause = En15 Flow  → Induced Abnormal Flows ME15, 17~19, 22, 24, 25 TH25, 28, 30, 32, 33	A0 Space	Move of M. RI (AF)	-----	(AO) Hydrogen Release
			VF or FV Boundary	-----	VF or FV -BF →En2 or En3	(AV) Air Inleakage
			BF Boundary	-----	BF-BF →En13	(AF) High Temp. Gas Inleakage (AB) Loss of High Temp. Gas
			FW Boundary	-----	FW-BF →En14	(AW) Air Inleakage
			Chemical Material	-----	SP-CHER →CH4	(AF) Temp. -Press. Increase
			Fuel Storage Material	Mobilization of I. RI = M11	ST-CHER →CI15	(AF) Temp. -Press. Increase
			SP-IMEB	Mobilization of C. RI = M10	SP-MEER →En12	(AF) Pressure Increase
			SU-IMEB	Mobilization of C. RI = M9	SU-MEER →En8, 10	(AF) Pressure Increase (AV) Pressure Increase

### 3.3 ブランケットエリアに関連するエネルギー・物質フロー

#### 3.3.1 ブランケットエリアに属するシステム構成要素

ブランケットエリアは核融合反応によって生成された中性子による燃料生産と熱変換を行うエリアであり、属するシステムとして以下のものを考える。

- (1) 増殖材
- (2) 中性子増倍材
- (3) ブランケットエリア空間
- (4) BO物質バウンダリ
- (5) BC物質バウンダリ

(VB、BF物質バウンダリ、燃料輸送機能については3.1.1、2で既述)

ブランケットエリアは格納エリア、真空エリア、冷却材エリア、燃料エリアと隣接しており、4つの物質バウンダリ（BO、VB、BC、BF）により空間配置が決定される。この内、燃料エリアとの間には、通常運転時に物質（増殖されたトリチウム）のフローが燃料輸送機能の制御下で形成されており、BFバウンダリは通常運転時にも制御された物質フローが形成されている物質バウンダリである。

これらのシステム構成要素の空間配置とRIソース、エネルギーソースの分布をまとめると、Fig. 3-3 のようになる。

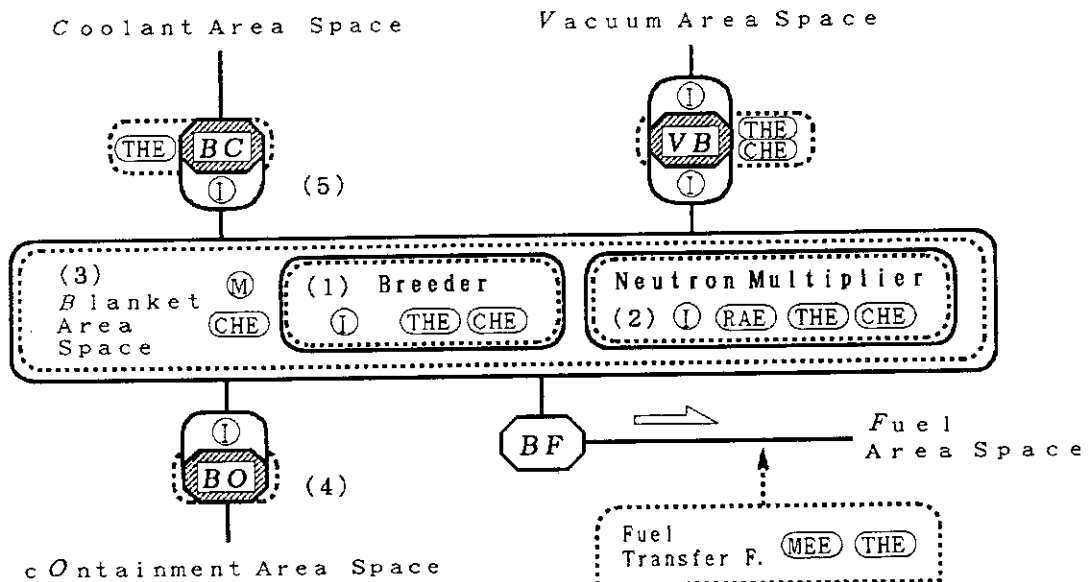


Fig. 3-3  
System Elements related  
to Blanket Area

(EME)	電磁エネルギー	(MEE)	機械エネルギー	(M)	易動性RI
(RAE)	放射エネルギー	(CHE)	化学エネルギー	(C)	機能制御性RI
(THE)	熱エネルギー			(I)	難移動性RI

この図によると、異常の進展において、ブランケットエリア内の「守るべき」アイテム

である「RI制御性」は、増殖材、中性子増倍材、VB物質バウンダリ、BC物質バウンダリ、BO物質バウンダリの状態異常により損なわれる可能性がある（RIの移動化）。また、「バウンダリ健全性」についても、物質バウンダリやエリア空間の状態異常により損なわれる可能性がある（物質バウンダリ破損）。

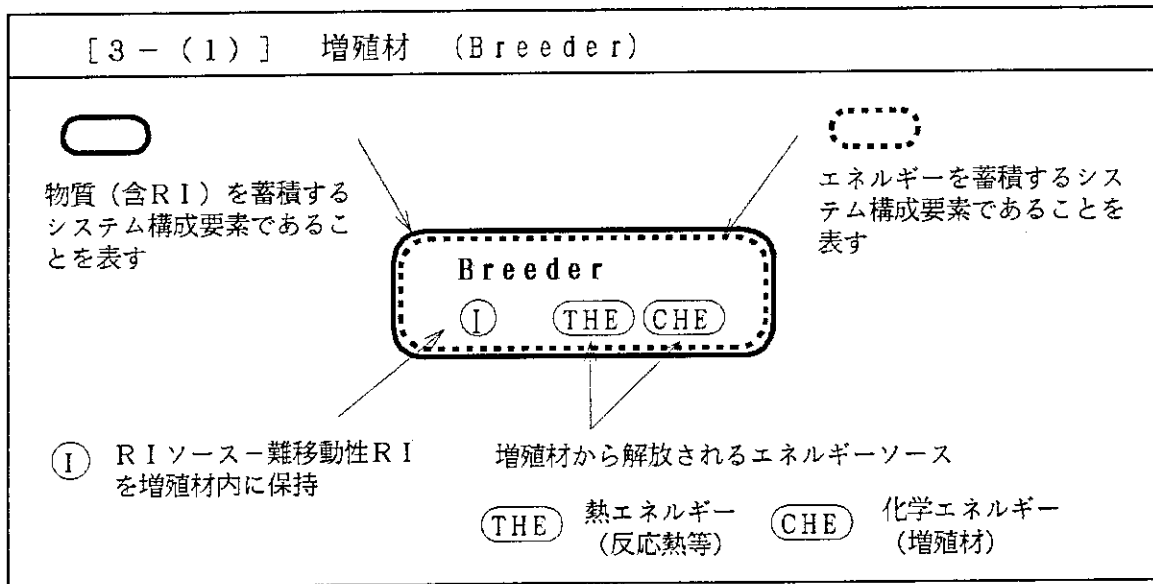
さらに、増殖材、中性子増倍材、ブランケットエリア空間内気体の異常化学反応によって新たな異常エネルギーフローを形成する可能性がある（エネルギーの異常解放）。

各システム構成要素に関連のあるエネルギー・物質フローを以下にまとめる。

### 3-(1) 増殖材

増殖材は核融合反応で得られた中性子により燃料（トリチウム）の増殖を行う機能である。この物質は内部に難移動性RI（トリチウム）を保持しており、熱エネルギーを蓄積するシステム構成要素である。また、熱エネルギーソースとなり、更に今回、固体増殖材を想定しているため化学エネルギーソースとなる可能性がある（Table 3.3-(1) 参照）。

Table 3.3-(1) Symbols of Breeder in the system model



次に、増殖材と他のシステム構成要素との間の通常・異常時のフローを以下にまとめる（Fig. 3.3-(1) 参照）。

放射エネルギーフローとして、プラズマと中性子増倍材からのものを考える（RD1, 7）。

熱エネルギーフローは、中性子増倍材、ブランケットエリア空間、BO、VB、BC物質バウンダリとの間に形成されている（TH36, 37, 38, 20, 39）。

化学エネルギーフローは、ブランケットエリア空間内物質との異常化学反応により物質フローを伴ってCH7が形成される。

物質フローは、ブランケットエリア空間との間に形成されている（M14）。

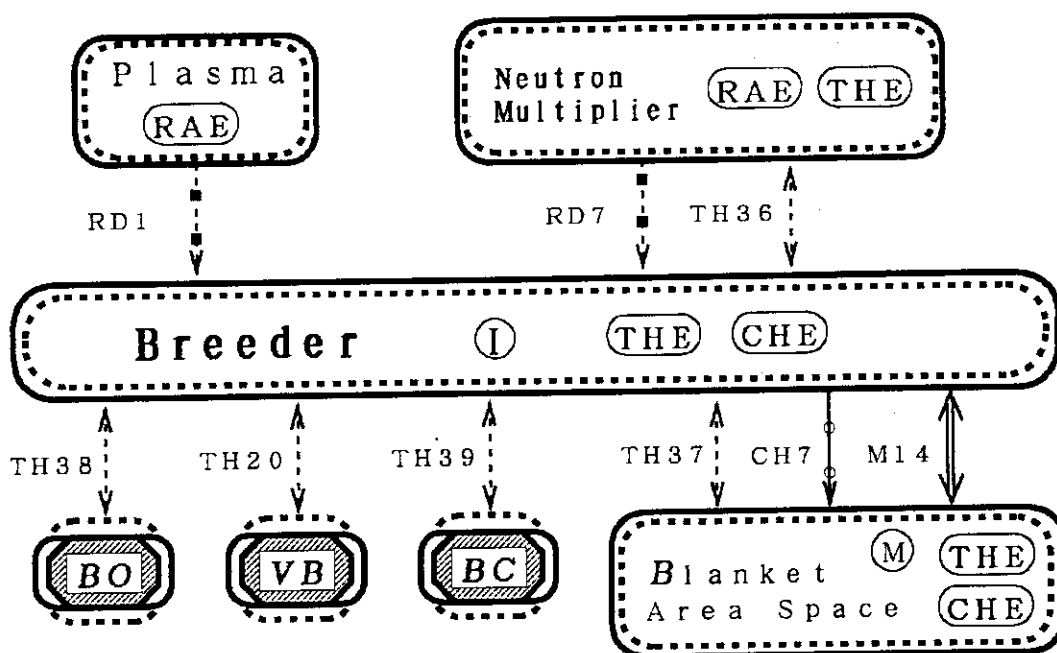


Fig. 3. 3- (1)  
Mass and Energy Flows related to Breeder

増殖材に関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下ようになる。

・放射エネルギーフロー

RD1 増殖材へのDT反応生成中性子入射によるフロー

RD7 中性子増倍反応生成中性子入射によるフロー

(RD1, 7 は、増殖反応<=プラズマ点灯>時にのみ形成される。)

・熱エネルギーフロー

TH20 増殖材とVBとの間に形成される熱輻射あるいは熱伝導によるフロー

TH36 増殖材と中性子増倍材との間に形成される熱輻射あるいは熱伝導によるフロー

TH37 増殖材とブランケットエリア空間に形成される熱伝達によるフロー

TH38 増殖材とBOとの間に形成される熱輻射あるいは熱伝導によるフロー

TH39 増殖材とBCとの間に形成される熱輻射あるいは熱伝導によるフロー

・化学エネルギーフロー

CH7 増殖材の異常化学反応により形成されるフロー

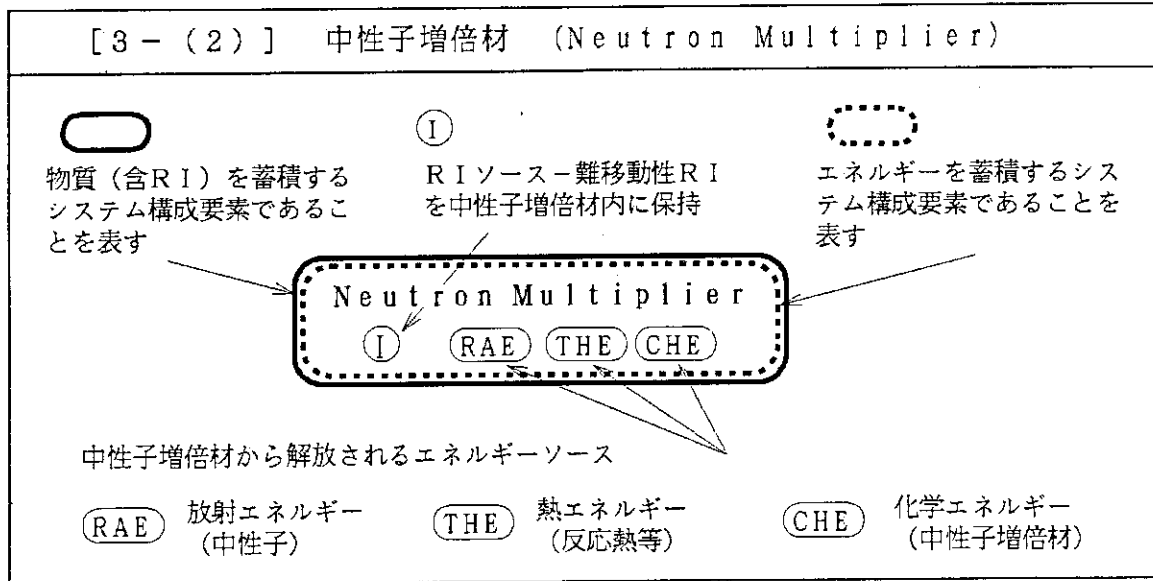
・物質フロー

M14 ブランケットエリア空間との間の吸収/脱離によるフロー

3-(2) 中性子増倍材

中性子増倍材は核融合反応で得られた中性子を増倍して増殖材に供給する機能である。この物質は内部に難移動性RI（トリチウム）を保持しており、熱エネルギーソースであり、化学エネルギーソースとなる可能性がある。また、熱エネルギーを蓄積するシステム構成要素である（Table 3.3-(2) 参照）。

Table 3.3-(2) Symbols of Neutron Multiplier in the system model



次に、増殖材と他のシステム構成要素との間の通常・異常時のフローを以下にまとめた (Fig. 3.3-(2) 参照)。

放射エネルギーフローとしては、プラズマから放出されて入射するものと増殖材に供給する増倍反応生成中性子を考えている (RD2, 7)。

熱エネルギーフローは、増殖材、ブランケットエリア空間、BO、VB、BC物質バウンダリとの間に形成されている (TH36, 40, 41, 21, 42)。

化学エネルギーフローは、ブランケットエリア空間内物質との異常化学反応により物質フローを伴って CH8が形成される。

物質フローは、ブランケットエリア空間との間に形成されている (M15)。

ここで、中性子増倍材に関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下のようになる。

・放射エネルギーフロー

RD2 中性子増倍材へのDT反応生成中性子入射によるフロー

RD7 中性子増倍材から増殖材への増倍反応生成中性子フロー

(RD2, 7 は、増殖反応<=プラズマ点灯>時にのみ形成される。)

・熱エネルギーフロー

- TH21 中性子増倍材とVBとの間に形成される熱輻射あるいは熱伝導によるフロー
- TH36 中性子増倍材と増殖材との間に形成される熱輻射あるいは熱伝導によるフロー
- TH40 中性子増倍材とブランケットエリア空間に形成される熱伝達によるフロー
- TH41 中性子増倍材とBOとの間に形成される熱輻射あるいは熱伝導によるフロー
- TH42 中性子増倍材とBCとの間に形成される熱輻射あるいは熱伝導によるフロー

・化学エネルギーフロー

- CH8 中性子増倍材の異常化学反応により形成されるフロー

・物質フロー

- M15 ブランケットエリア空間との間の吸収/脱離によるフロー

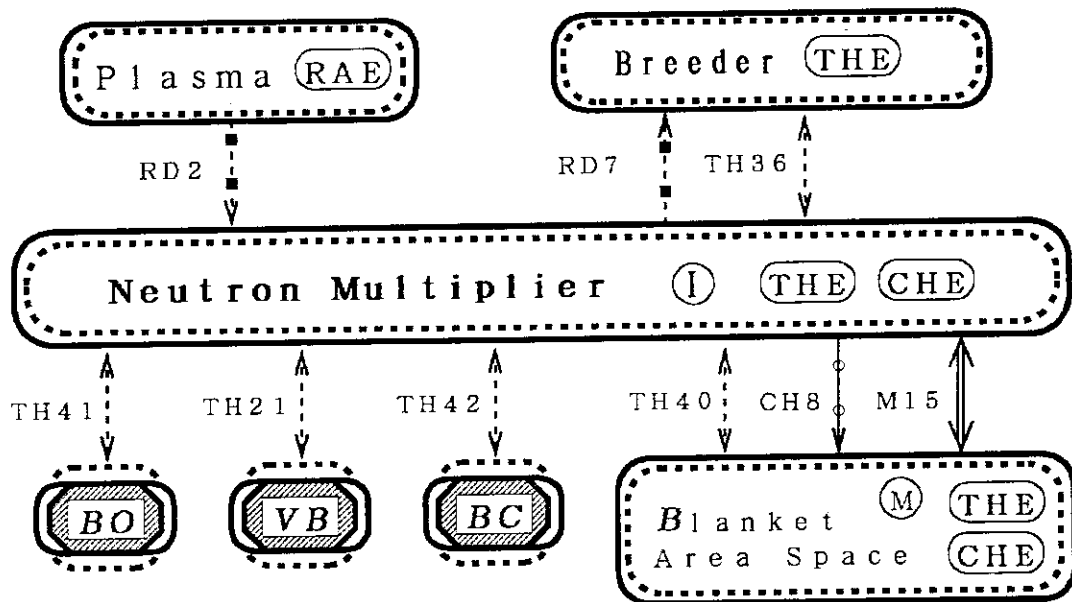


Fig. 3. 3-(2)  
Mass and Energy Flows related to  
Neutron Multiplier

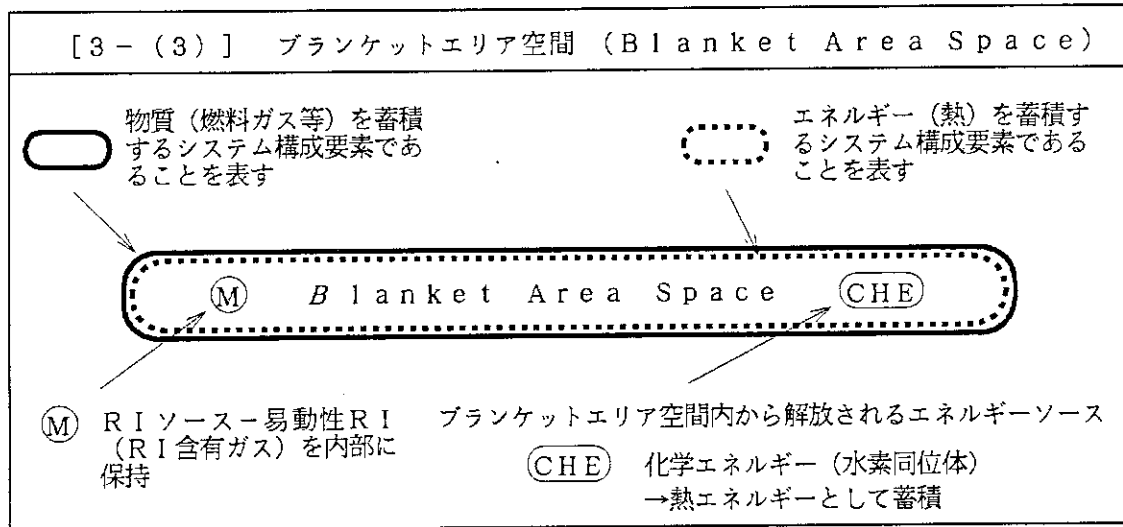
3-(3) ブランケットエリア空間

ブランケットエリア空間はブランケットエリア物質バウンダリによって閉じられている空間であり、増殖トリチウムの移送に用いられる。

この空間には固体増殖材からのトリチウム回収を行う設計であれば、He等のパージガスと易動性RI（トリチウムガス）で満たされており、物質バウンダリの破損による空気の流入が起こると、条件次第ではRIの移動とともに内部に含まれている水素同位体が燃焼反応を起こし、化学エネルギーソースが解放されることになる。また、この空間は熱エネルギーを蓄積するシステム構成要素であり、蓄積量によっては温度あるいは圧力上昇に

よるブランケットバウンダリ破損を招く可能性がある (Table 3.3-(3) 参照)。そこで、事象の進展に影響を与えるブランケットエリア空間の状態変化を解析するために、ブランケットエリア空間に関連のある物質 (含 R I) フローとエネルギーフローを明確にする必要がある。

Table 3.3-(3) Symbols of Blanket Area Space in the system model



以下に、ブランケットエリア空間と他のシステム構成要素との間の通常・異常時のフローをまとめた (Fig. 3.3-(3) 参照)。

熱エネルギーフローは、増殖材、中性子増倍材、物質バウンダリ (B O、V B、B C) との間にそれぞれ、熱伝達によるフロー TH37, 40, 43, 19, 44 が形成されている。

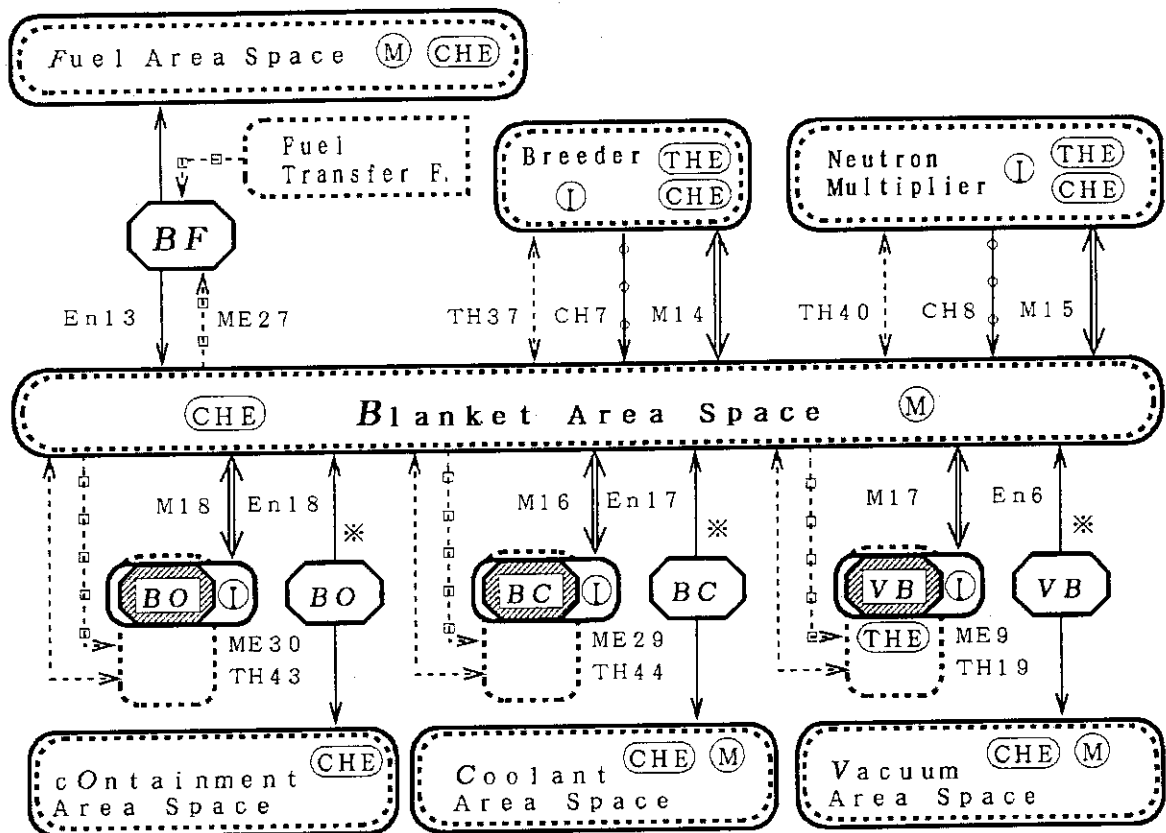
機械エネルギーフローとしては、B F、B C、V B、B O への圧力負荷が形成されており、これらのフローをそれぞれ ME27, 29, 9, 30 とする。

化学エネルギーフローは、まず空間内部の化学エネルギーソース (水素同位体) は燃焼反応により熱エネルギーとしてそのまま内部に蓄積される。増殖材と中性子増倍材の異常化学反応により物質フローを伴って CH7, 8 を形成する。

物質フローは、増殖材、中性子増倍材、物質バウンダリ (B C、V B、B O) ブランケットエリア側面との間に、吸収/脱離あるいは吸着/脱離現象による R I を含んだフローが形成されている (M14~18)。

物質を伴うエネルギーフローは、通常運転時において、燃料エリア空間との間に定常のフロー (En13) が形成されている。異常時には、物質バウンダリ (B F、B C、V B、B O) の破損によって En13, 17, 6, 18 が形成される。

このように、ブランケットエリア空間は事象シーケンス上において、他のシステム構成要素との間に形成されるフローが変化すると状態異常を起こして、ブランケットエリア内部の「R I 制御性」 (増殖材、中性子増倍材、B O、V B、B C に含まれる R I の移動化) や「バウンダリ健全性」 (B O、V B、B C、B F バウンダリ破損) に影響を与える。



※ … 破損時のみ形成

Fig. 3. 3-(3)

Mass and Energy Flows related to Blanket Area Space

ここで、ブランケットエリア空間に関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下ようになる。

・熱エネルギーフロー

- TH19 ブランケットエリア空間とVBとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH37 ブランケットエリア空間と増殖材との間に形成される熱伝達によるフロー
- TH40 ブランケットエリア空間と中性子増倍材との間に形成される熱伝達によるフロー
- TH43 ブランケットエリア空間とBOとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH44 ブランケットエリア空間とBCとの間に形成される熱伝達によるフロー

・機械エネルギーフロー

- ME9 ブランケットエリア空間のVBへの圧力負荷を表すフロー
- ME27 ブランケットエリア空間のBFへの圧力負荷を表すフロー
- ME29 ブランケットエリア空間のBCへの圧力負荷を表すフロー
- ME30 ブランケットエリア空間のBOへの圧力負荷を表すフロー



・物質フロー

- M14 増殖材との間の吸収／脱離現象によるフロー
- M15 中性子増倍材との間の吸収／脱離現象によるフロー
- M16 B Cとの間の吸収／脱離現象によるフロー
- M17 V Bとの間の吸収／脱離現象によるフロー
- M18 B Oとの間の吸収／脱離現象によるフロー

・化学エネルギーフロー

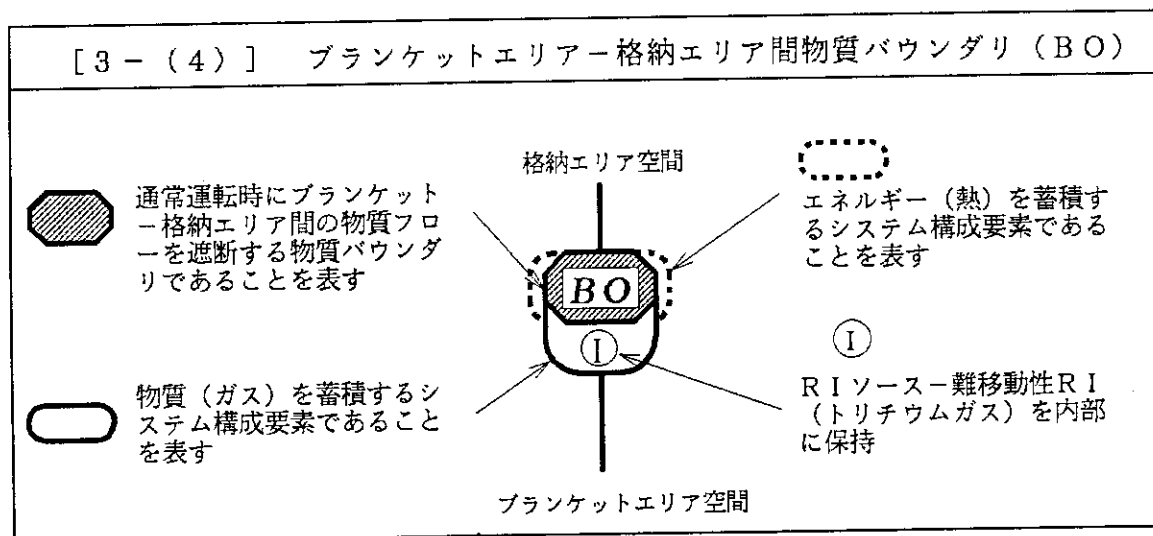
- CH7 増殖材の異常化学反応により形成されるフロー
- CH8 中性子増倍材の異常化学反応により形成されるフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

- En6 V B破損時のブランケットエリアー燃料エリア空間間の物質移動によるフロー
- En13 (通常運転時) 燃料輸送機能の制御による気体粒子のフロー  
(B F破損時) ブランケットエリアー燃料エリア空間間の物質移動によるフロー
- En17 B C破損時のブランケットエリアー燃料エリア空間間の物質移動によるフロー
- En18 B O破損時のブランケットエリアー燃料エリア空間間の物質移動によるフロー

3-(4) B Oバウンダリ (ブランケットー格納エリア間物質バウンダリ)

Table 3.3-(4) Symbols of B O Boundary in the system model



B Oバウンダリはブランケットエリア空間と格納エリア空間との間の物質境界であり、通常運転時には両空間の物質フローを遮断している。

B Oはブランケットエリア側面に難移動性 R I (吸蔵トリチウム等) を保持しており、バウンダリの温度上昇等によって移動化する可能性がある。また、エネルギーに関しては、

熱エネルギーを蓄積するシステム構成要素であると考え、このエネルギー蓄積変化は、BO温度の状態変数の変化によって判る (Table 3.3-(4)参照)。

このバウンダリの状態異常によっては、難移動性RIの移動化 (=RI制御性の喪失) あるいはBOバウンダリ破損 (=バウンダリ健全性の喪失) が起こる。従って、BOバウンダリの状態変化に影響するエネルギー・物質 (含RI) フローについて以下に述べることにする (Fig. 3.3-(4) 参照)。

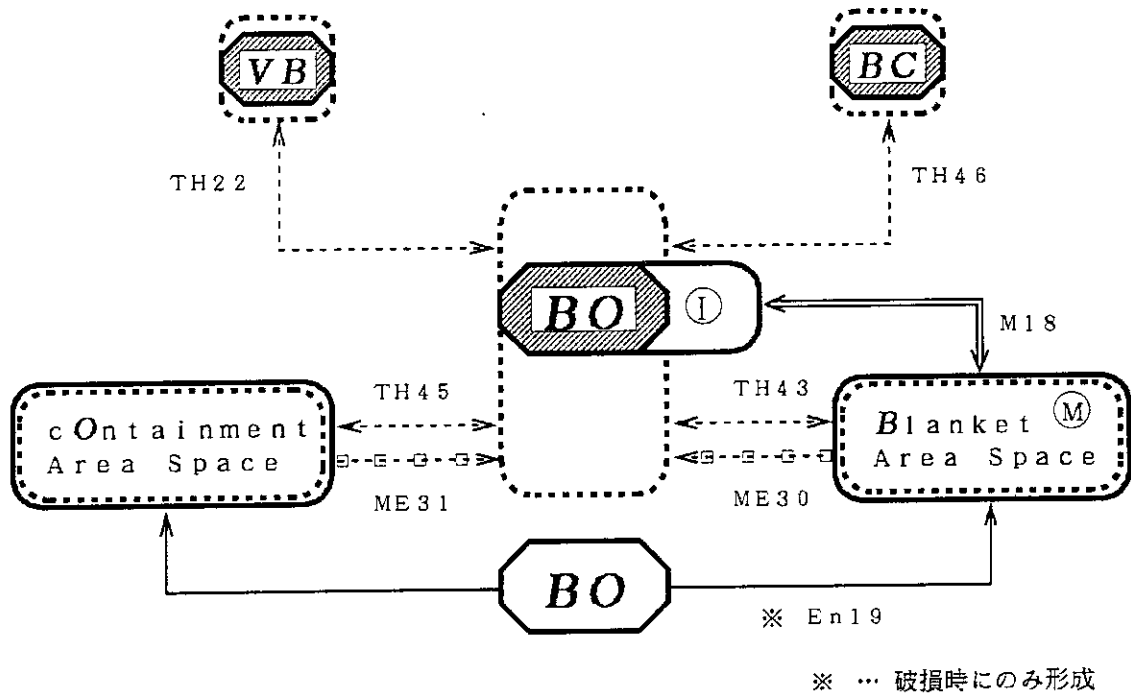


Fig. 3.3-(4) Mass and Energy Flows related to BO Boundary

熱エネルギーフローとしては、常に形成されている熱エネルギーフローとして、エリア空間 (ブランケット、格納) との間の熱伝達によるフロー (TH43, 45) と、同一エリアの物質バウンダリ (VB、BC) との間の熱伝導あるいは熱輻射によるもの (TH22, 46) が考えられる。

機械エネルギーフローは、BOバウンダリ健全時に、エリア空間 (ブランケット、格納) の圧力負荷によるものを考える (ME30, 31)。

物質フローとしては、ブランケットエリア空間との間の吸収/脱離現象によるものが考えられる (M18)。

エネルギーを伴う物質フローとしては、BOバウンダリ破損時にBOバウンダリを通じてブランケットエリア空間と格納エリア空間との間の物質移動によるフローがBOに関連するフローとして考えられる (En19)。

BOバウンダリが保持している難移動性RIは、バウンダリの状態異常 (温度) と燃料エリア空間の状態異常 (温度、圧力) に起因するトリチウムの脱離等により移動化する。

また、BOバウンダリは、バウンダリの状態異常に起因した熱的な影響（温度上昇）や機械的な影響（熱応力・ブランケットエリア空間圧力・格納エリア空間圧力等による応力増大）が限界を越えた場合にバウンダリ破損を起こし、リークパスを形成する。

このようにBOバウンダリは事象シーケンス上で、他のシステム構成要素とのフローの変化により、RIの移動化あるいはバウンダリ破損によって新たなフローを形成する。

これらのBOバウンダリに関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下のようなになる。

・熱エネルギーフロー

- TH22 BOとVBとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー
- TH43 BOとブランケットエリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー
- TH45 BOと格納エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー
- TH46 BOとBCとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー

・機械エネルギーフロー

- ME30 BOへのブランケットエリア空間の圧力負荷を表すフロー
- ME31 BOへの格納エリア空間の圧力負荷を表すフロー

・物質フロー

- M18 ブランケットエリア空間との間の吸収／脱離現象によるフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

- En19 BO破損時のブランケットエリアー格納エリア空間間の物質移動によるフロー

### 3-(5) BCバウンダリ（ブランケットー冷却材エリア間物質バウンダリ）

ブランケットエリア空間と冷却材エリア空間の間には物質境界BCが存在し、通常運転時には両空間の物質フローを遮断している。BCバウンダリは、ブランケットエリア側面に難移動性RI（吸蔵トリチウム等）を保持している。また、エネルギーに関しては、熱エネルギー、電磁エネルギーを蓄積するシステム構成要素であると考えられる。更に、熱エネルギーソース（崩壊熱）を内包している。エネルギーの蓄積変化は、BCに流れる渦電流あるいは温度の状態変化によって判る（Table 3.3-(5) 参照）。

この物質バウンダリBCは、バウンダリの状態異常によっては難移動性RIの移動化（=RI制御性の喪失）あるいはBCバウンダリ破損（=バウンダリ健全性の喪失）が起こる。但し、BCバウンダリの破損は直接的にはリークパスを形成しないが、新たなRIの移動化あるいはバウンダリ破損を誘発する可能性がある。

このような守るべきアイテムの健全性を考慮するため、BCの状態変化に影響するエネルギー・物質（含RI）フローについて以下に述べることにする（Fig. 3.3-(5) 参照）。

Table 3.3-(5) Symbols of BC Boundary in the system model

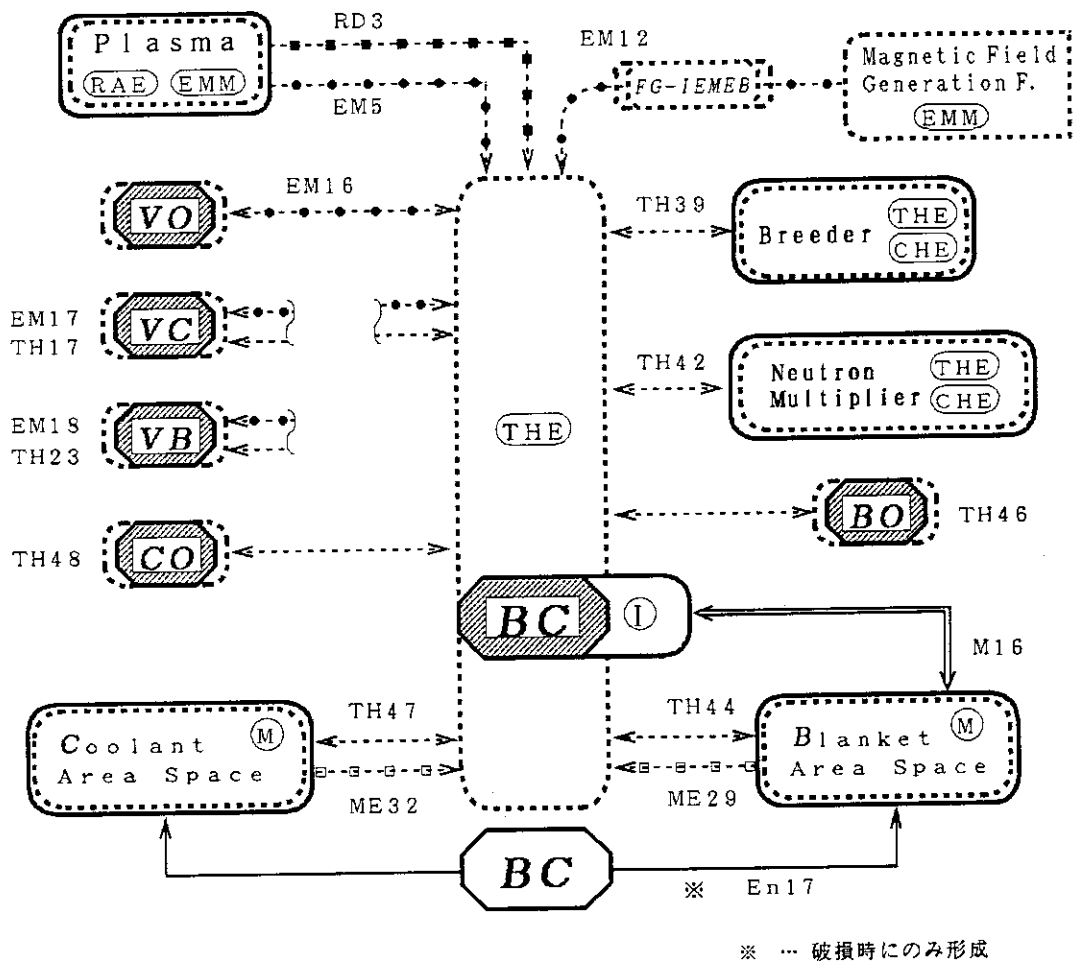
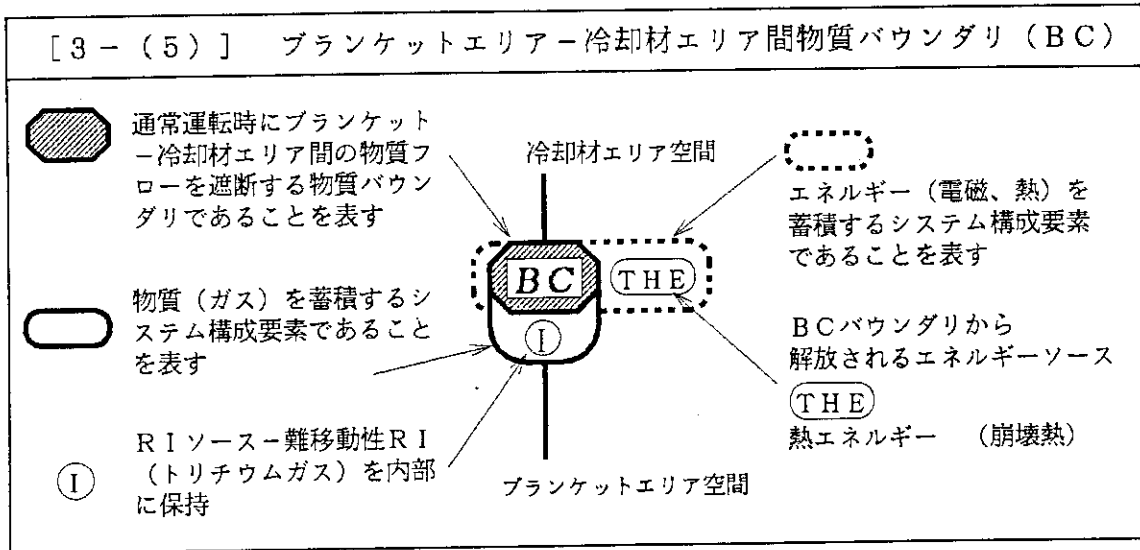


Fig. 3.3-(5) Mass and Energy Flows related to BC Boundary

電磁エネルギーフローは、磁場変動時あるいはプラズマディスラプション時にプラズマ、磁場形成機能電磁エネルギーバウンダリとの間に形成され(EM5, 12)、渦電流が誘起される。また、このとき同時にVO、VC、VBにも渦電流が誘起されており、これらの物質バウンダリとは相互誘導結合関係により電磁エネルギーフローが形成される(EM16, 17, 18)。

プラズマ点火時には、プラズマからのDT反応生成中性子の入射があり、放射エネルギーフローが形成され、内部に熱エネルギーとして蓄積される(RD3)。

熱エネルギーフローとしては、エリア空間(ブランケット、冷却材)との間の熱伝達によるもの(TH44, 47)、増殖材や中性子増倍材、他の真空バウンダリ(VC、VB、BO、CO)との間の熱伝導あるいは熱輻射によるものが考えられる(TH39, 42, 17, 23, 46, 48)。

機械エネルギーフローは、BCバウンダリ健全時に、エリア空間(ブランケット、冷却材)の圧力負荷によるものを考える(ME29, 32)。

物質フローとしては、ブランケットエリア空間との間の吸収/脱離現象によるものが考えられる(M16)。

エネルギーを伴う物質フローとしては、BCバウンダリ破損時にBCバウンダリを通じてブランケットエリア空間と冷却材エリア空間との間の物質移動によるフローがBCに関連するフローとして考えられる(En17)。

BCバウンダリが保持している難移動性RIは、バウンダリの状態異常(温度)とブランケットエリア空間の状態異常(温度、圧力)に起因するトリチウムの脱離が起きて移動化する(M16)。

また、BCバウンダリは、バウンダリの状態異常に起因した熱的な影響(温度上昇)や機械的な影響(電磁応力・熱応力・ブランケットエリア空間圧力・冷却材エリア空間圧力等による応力増大)が限界を越えた場合にバウンダリ破損を起こし、エネルギー・物質の異常フローを形成する(En17)。そして、これらの異常フローによりブランケット・冷却材エリア内のシステム構成要素の状態異常がエリア内RIの移動化やRI障壁であるBOやCOバウンダリの破損を誘発する可能性がある。

このようにBCバウンダリは事象シーケンス上で、他のシステム構成要素とのフローの変化により、RIの移動化あるいはバウンダリ破損によって新たなフローを形成する。

BCバウンダリに関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下のようになる。

#### ・電磁エネルギーフロー

- EM5 プラズマ異常による磁場変動で形成されるBCへのフロー
- EM12 磁場形成機能異常による磁場変動で形成されるBCへのフロー
- EM16 BC-VO間の相互電磁誘導現象によるフロー
- EM17 BC-VC間の相互電磁誘導現象によるフロー
- EM18 BC-VB間の相互電磁誘導現象によるフロー

- ・放射エネルギーフロー
  - RD3 BCへのDT反応生成中性子入射によるフロー
- ・熱エネルギーフロー
  - TH17 BCとVCとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー
  - TH23 BCとVBとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー
  - TH39 BCと増殖材との間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー
  - TH42 BCと中性子増倍材との間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー
  - TH44 BCとブランケットエリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー
  - TH46 BCとBOとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー
  - TH47 BCと冷却材エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー
  - TH48 BCとCOとの間に形成される熱伝導あるいは熱輻射によるフロー
- ・機械エネルギーフロー
  - ME29 BCへのブランケットエリア空間の圧力負荷を表すフロー
  - ME32 BCへの冷却材エリア空間の圧力負荷を表すフロー
- ・物質フロー
  - M16 ブランケットエリア空間との間の吸収/脱離現象によるフロー
- ・エネルギーを伴う物質フロー
  - En17 BC破損時のブランケットエリアー冷却材エリア空間間の物質移動によるフロー

### 3.3.2 ブランケットエリアにおける異常事象の抽出

ブランケットエリアにおける異常事象の抽出過程をTable 3-3に示す。Table 3-3に示したブランケットエリアにおける異常事象には以下のものがある。

Temperature - Pressure Increase

Loss of High Temperature Gas

Coolant Inleakage

Table 3-3 Abnormal Events in the Blanket Area related System Element

Abnormal Event : Abnormal Condition of System elements	Cause : Abnormal Event Initiator	Abnormal Flows : Mass and/or Energy Flows induced by Causes	Response of System elements			
			Influenced Elements	Effect on RI Controllability	Possible Next Event Initiator	Induced Abnormal Conditions
Temperature - Pressure Increase	1. (AC) Control Failure of Material Circulation Function 2. (AC) Control Failure of Heat Conversion Function 3. Control Failure of Fuel Transfer Function 4. (AV) Plasma Power Excursion 5. (AC) Loss of Coolant	Cause 1, 2, 5 = TH47 Flow Cause 3 = En13 Flow Cause 4 = RD1, RD2 → Induced Abnormal Flows TH19, 37, 40 43, 44 ME9, 27, 29, 30	Breeder	Mobilization of I. RI = M14	—	—
			Neutron Multiplier	Mobilization of I. RI = M15	—	—
			B0 Boundary	Mobilization of I. RI = M18	B0-BF → En18	(AB) Loss of High Temp. Gas (AO) Pressure Increase (AO) Hydrogen Release
			VB Boundary	Mobilization of I. RI = M7, M17	VB-BF → En6	(AB) Loss of High Temp. Gas (AV) High Temp. Gas Inleak.
			BC Boundary	Mobilization of I. RI = M16	BC-BF → En17	(AB) Coolant Inleakage (AC) Loss of Coolant
Loss of High Temperature Gas	1. B0 Boundary Failure	Cause 1 = En18 Cause 2 = En6	BF Boundary	—	BF-BF → En13	(AB) Loss of High Temp. Gas (AF) High Temp. Gas Inleak.
			AB Space	Move of M. RI	Space-CIER	(AB) Temp. - Press. Increase

Table 3-3 Contd.

Abnormal Event	Cause	Abnormal Flows	Response of System elements			
			A0 Space (for Cause 1)	Move of M. RI (from AB Space)	—————	(A0) Hydrogen Release
(Loss of High Temp. Gas)	2. VB Boundary Failure	Cause 3 = En13 → Induced Abnormal Flows TH19, 37, 40 43, 44 ME9, 27, 29, 30	AV or AF Space (Cause 2 or 3)	Move of M. RI	—————	(AV, AF) High Temp. Gas Inleakage
	3. BF Boundary Failure		AB Space	Move of M. RI	—————	(AB) Temp. -Press Increase
Coolant Inleakage	BC Boundary Failure	Cause = En17 Flow  → Induced Abnormal Flows TH19, 37, 40 43, 44 ME9, 27, 29, 30	AC Space	Move of M. RI	—————	(AC) Loss of Coolant
			Breeder	Mobilization of I. RI = M14	Breeder-CHER →CH7	(AB) Temp. -Press Increase
	Neutron Multiplier	Mobilization of I. RI = M15	Neutron →CH8 Multiplier-CHER	(AB) Temp. -Press Increase		
	BO Boundary	Mobilization of I. RI = M18	BO-BF  →En18	(AB) Loss of High Temp. Gas (A0) Coolant Release (A0) Hydrogen Release		
	VB Boundary	Mobilization of I. RI = M17, M17	VB-BF  →En6	(AB) Loss of High Temp. Gas (AV) High Temp. Gas Leak.		
	BF Boundary	—————	BF-BF  →En13	(AB) Loss of High Temp. Gas (AF) High Temp. Gas Inleak.		



### 3.4 冷却材エリアに関連するエネルギー・物質フロー

#### 3.4.1 冷却材エリアに属するシステム構成要素

冷却材エリアは冷却材による熱輸送エリアであり、属するシステムとして以下のものを考える。

- (1) 冷却材エリア空間
  - (2) CO物質バウンダリ
  - (3) 熱輸送物質（冷却材）循環機能
  - (4) 熱変換機能（+発電機能）
- （VC、BC物質バウンダリについては3.1.1、3.1.3で既述）

冷却材エリアは格納エリア、真空エリア、ブランケットエリアと隣接しており、通常運転時において、これらのエリアとの物質フローは、3つの物質バウンダリ（CO、VC、BC）により遮断されている。

上記のシステム構成要素の空間配置とRIソース、エネルギーソースの分布をまとめると、Fig.3-4 のようになる。この図によると、異常の進展において、冷却材エリア内の「守るべき」アイテムである「バウンダリ健全性」については、冷却材エリア物質バウンダリ（VB、BC、CO）やエリア空間の状態異常により損なわれる可能性がある（物質バウンダリ破損）。

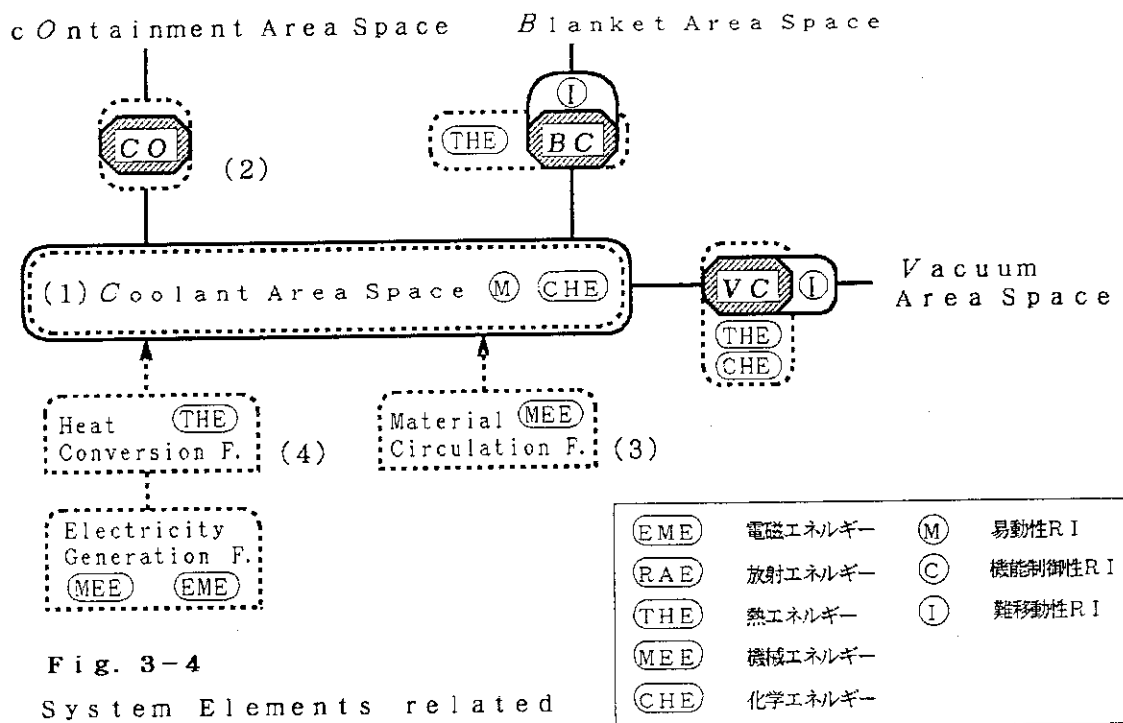


Fig. 3-4  
System Elements related to Coolant Area

各システム構成要素に関連のあるエネルギー・物質フローを以下にまとめる。

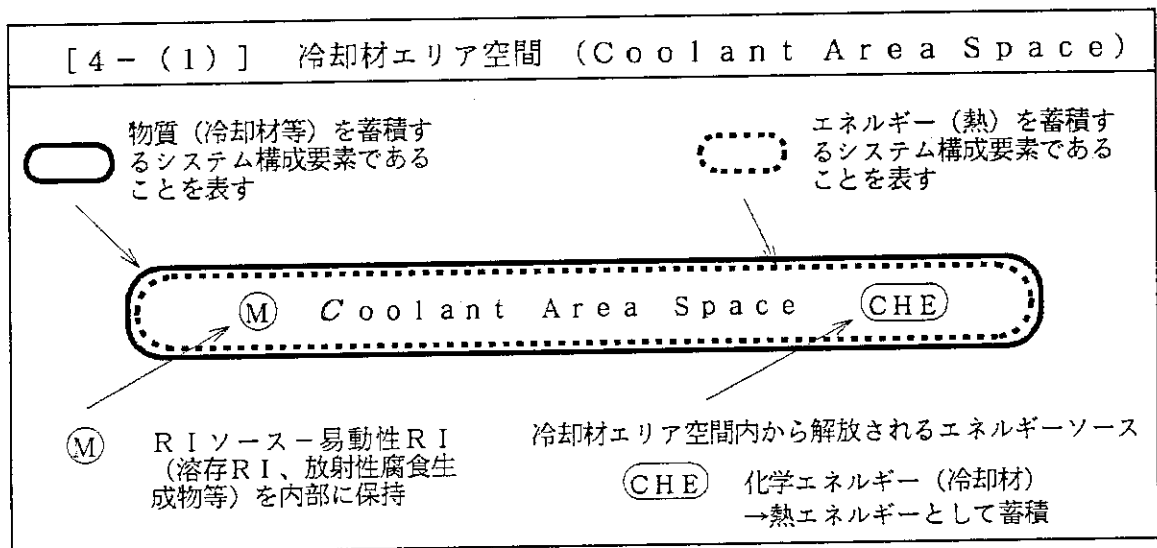
4-(1) 冷却材エリア空間

冷却材エリア空間は冷却材エリア物質バウンダリによって閉じられている空間である。この空間は内部に易動性RI（溶存あるいは放射性腐食生成物）を保持しており、物質バウンダリの破損によって他のエリア内部の物質と冷却材が接触すると、接触物質の条件によっては異常な化学反応を起こし、化学エネルギーソースが解放されることになる。

また、この空間は熱エネルギーを蓄積するシステム構成要素であり、蓄積量によっては温度あるいは圧力上昇による冷却材バウンダリ破損を招く可能性がある（Table 3.4-(1) 参照）。

そこで、事象の進展に影響を与える冷却材エリア空間の状態変化を解析するために、冷却材エリア空間に関連のある物質（含RI）フローとエネルギーフローを明確にする必要がある。

Table 3.4-(1) Symbols of Coolant Area Space in the system model



そのために、冷却材エリア空間と他のシステム構成要素との間の通常・異常時のフローを以下にまとめた（Fig. 3.4-(1) 参照）。

熱エネルギーフローとしては、エリア空間と物質バウンダリ（CO、VC、BC）との間にそれぞれ、TH49, 14, 47が形成されている。また、熱変換機能により、エリア空間内の冷却材に蓄積された熱エネルギーの除去が行われている（TH50）。

機械エネルギーフローとしては、物質バウンダリ健全時には、物質バウンダリ（VC、BC、CO）への圧力負荷としてそれぞれ ME8, 32, 33が形成されている。また、熱輸送物質（冷却材）循環機能によって、エリア空間内部の冷却材の循環が行われている（ME34）。

化学エネルギーフローは、冷却材と反応可能性のある他エリア内物質が接触するエリアで形成される。この化学エネルギーは熱エネルギーとしてそのまま反応エリア内部に蓄積される。

エネルギーを伴う物質フローが、異常時に限り、物質バウンダリ (CO、VC、BC) の破損によって En20, 5, 17が形成される。

このように、冷却材エリア空間は事象シーケンスにおいて、他のシステム構成要素との間に形成されるフローが変化すると状態異常を起こして、冷却材エリアや隣合うエリア (真空エリア、ブランケットエリア) 内部の「RI制御性」や「バウンダリ健全性」に影響を与える。

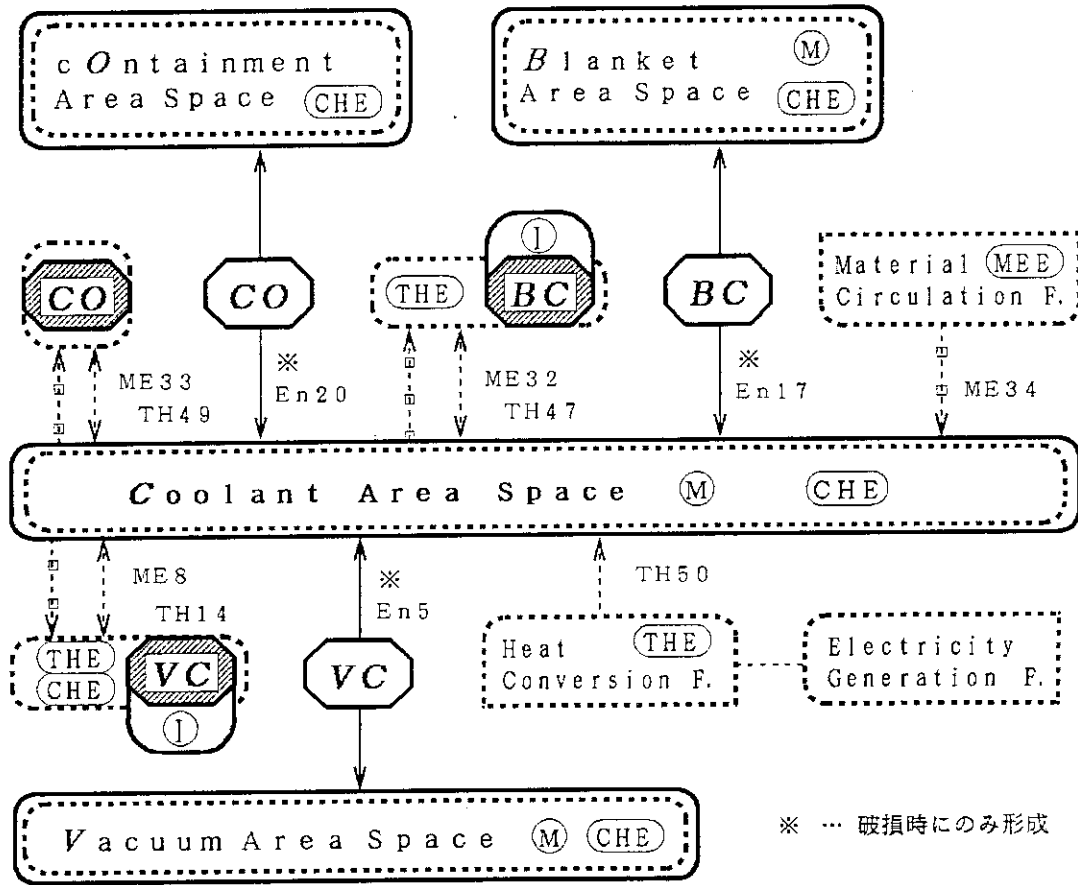


Fig. 3. 4- (1) Mass and Energy Flows related to Coolant Area Space

ここで、冷却材エリア空間に関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下ようになる。

・熱エネルギーフロー

- TH14 冷却材エリア空間とVCとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH47 冷却材エリア空間とBCとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH49 冷却材エリア空間とCOとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH50 熱変換機能による冷却材蓄積熱の除去時に形成されるフロー

・機械エネルギーフロー

- ME8 冷却材エリア空間のV Cへの圧力負荷を表すフロー
- ME32 冷却材エリア空間のB Cへの圧力負荷を表すフロー
- ME33 冷却材エリア空間のC Oへの圧力負荷を表すフロー
- ME34 熱輸送物質循環機能による冷却材の循環時に形成されるフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

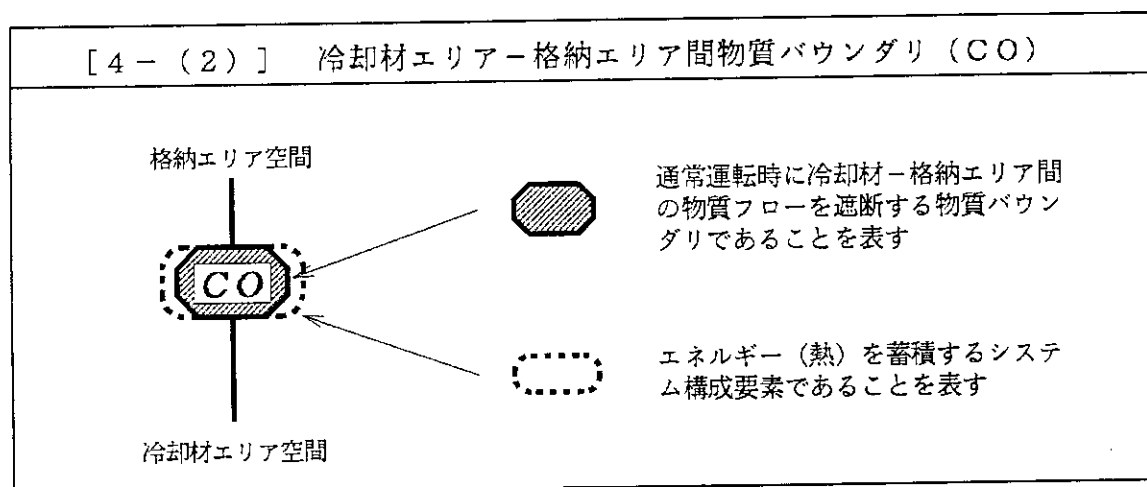
- En5 V C破損時の冷却材エリアー真空エリア空間間の物質移動によるフロー
- En17 B C破損時の冷却材エリアーブランケットエリア空間間の物質移動によるフロー
- En20 C O破損時の冷却材エリアー格納エリア空間間の物質移動によるフロー

4-(2) C Oバウンダリ (冷却材ー格納エリア間物質バウンダリ)

C Oバウンダリは冷却材エリア空間と格納エリア空間との間の物質境界であり、通常運転時には両空間の物質フローを遮断している。

C Oは、エリア側面のR Iインベントリが無視できると考え、R I保持を仮定していない。また、エネルギーに関しては、熱エネルギーを蓄積するシステム構成要素であると考え、蓄積変化は、C O温度の状態変数の変化によって判る (Table 3.4-(2)参照)。

Table 3.4-(2) Symbols of C O Boundary in the system model



このバウンダリの状態異常によっては、C Oバウンダリ破損 (=バウンダリ健全性の喪失) が起こる。従って、C Oバウンダリの状態変化に影響するエネルギーフローについて以下に述べることにする (Fig. 3.4-(2) 参照)。

熱エネルギーフローとしては、常に形成されているフローとして、エリア空間 (冷却材、格納) との間の熱伝達によるものが考えられる (TH49, 51)。

機械エネルギーフローは、C Oバウンダリ健全時に、エリア空間 (冷却材、格納) の圧

力負荷によるものを考える (ME33, 35)。

エネルギーを伴う物質フローとしては、COバウンダリ破損時に冷却材エリア空間と格納エリア空間との間の物質移動により形成されるフローが考えられる(En16)。

このようなフローの流出入の異常によりCOバウンダリが状態異常になり、熱的な影響(温度上昇)や機械的な影響(熱応力・冷却材エリア空間圧力・格納エリア空間圧力等による応力増大)が限界を越えた場合に、COバウンダリはバウンダリ破損を起こし、新たに冷却材エリア空間から格納エリア空間へのリークパスを形成する。

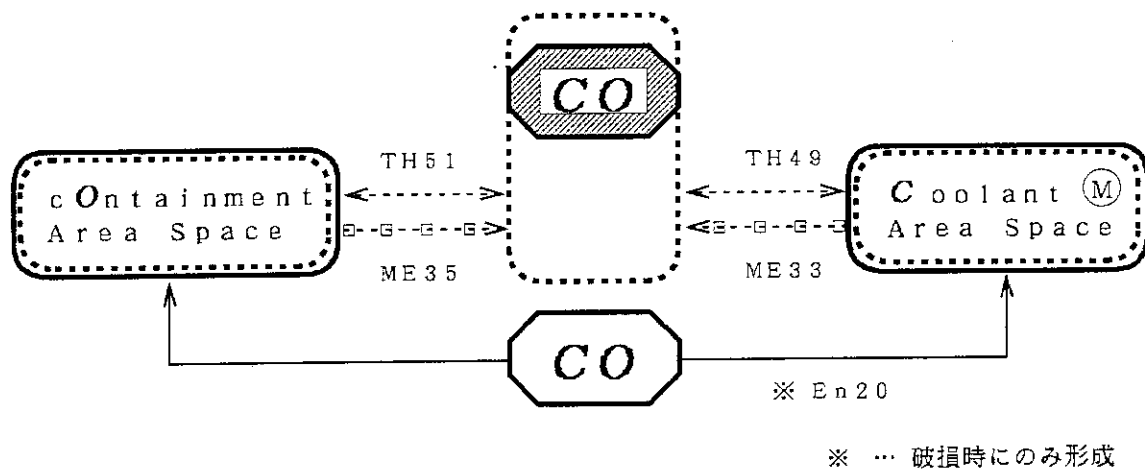


Fig. 3. 4-(2) Mass and Energy Flows related to CO Boundary

これらのCOバウンダリに関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下のようなになる。

・熱エネルギーフロー

- TH49 COと冷却材エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー
- TH51 COと格納エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー

・機械エネルギーフロー

- ME33 COへの冷却材エリア空間の圧力負荷を表すフロー
- ME35 COへの格納エリア空間の圧力負荷を表すフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

- En20 CO破損時の冷却材エリア空間-格納エリア空間間の物質移動によるフロー

4-(3) 熱輸送物質(冷却材)循環機能

熱輸送物質(冷却材)循環機能は、核融合反応や燃料増殖反応によって生じたエネルギーを熱変換機能、発電機能へ移送し、かつ高温物質バウンダリ(VC、BC)を冷却するために、熱輸送物質(冷却材)を高温物質バウンダリ(VC、BC)、COバウンダリ、

熱変換機能の間を循環させる機能である。本機能は、熱輸送物質循環機能制御部に機械エネルギーを内包し、このエネルギーにより熱輸送物質循環の制御を行う (Table 3.4-(3) 参照)。

熱輸送物質循環機能作動時には、機能制御部からの機械エネルギーフローが形成されて (ME34)、冷却材エリア空間内の冷却材循環が行われる (Fig. 3.4-(3) 参照)。

従って、熱輸送物質循環機能に関連するエネルギー・物質フローは、

ME34 熱輸送物質循環機能による冷却材の循環時に形成されるフロー

である。事象シーケンス上で、機能の初期異常起因「機能制御異常」が起こった場合に、このフローの異常が発生することになる。

Table 3.4-(3) Symbols of Material Circulation Function in the system model

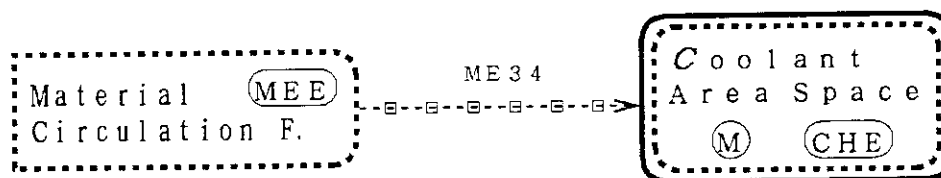
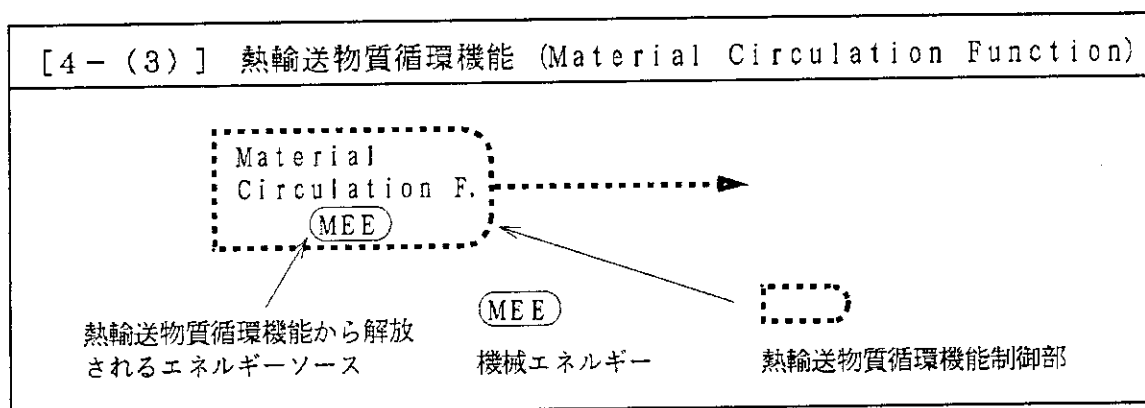


Fig. 3.4-(3)

Mass and Energy Flows related to Material Circulation Function

4-(4) 熱変換機能 (+ 発電機能)

熱変換機能は、熱輸送物質循環機能によって送られてくる熱輸送物質 (冷却材) が蓄積している熱を除去し、一定温度の熱輸送物質 (冷却材) を循環フローに戻す機能である。本機能は熱変換機能制御部内に (負の) 熱エネルギーを内包している (Table 3.4-(4) 参照)。発電機能は、この除熱によるエネルギーを電気エネルギーに変換する機能であるが、この発電機能の異常による影響は熱変換機能の異常という形で代表できる。

熱変換機能作動時には、機能制御部からの熱エネルギーフローが形成されて(TH50)、冷却材エリア空間内の冷却材循環が行われる (Fig. 3.4-(4) 参照)。

従って、熱変換機能に関連するエネルギー・物質フローは、

TH50 熱変換機能による冷却材蓄積熱の除去時に形成されるフロー

である。事象シーケンス上で、機能の初期異常起因「機能制御異常」が起こった場合に、このフローの異常が発生することになる。

Table 3.4-(4) Symbols of Heat Conversion Function in the system model

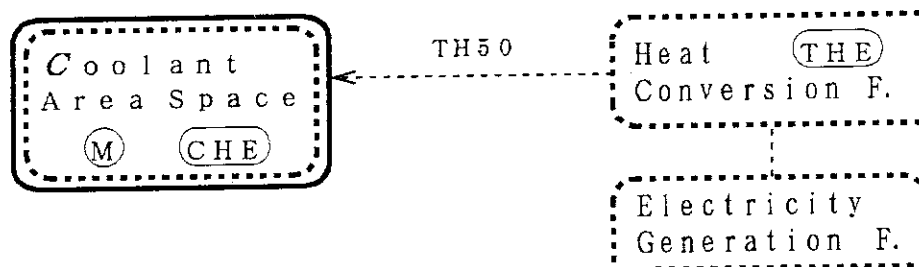
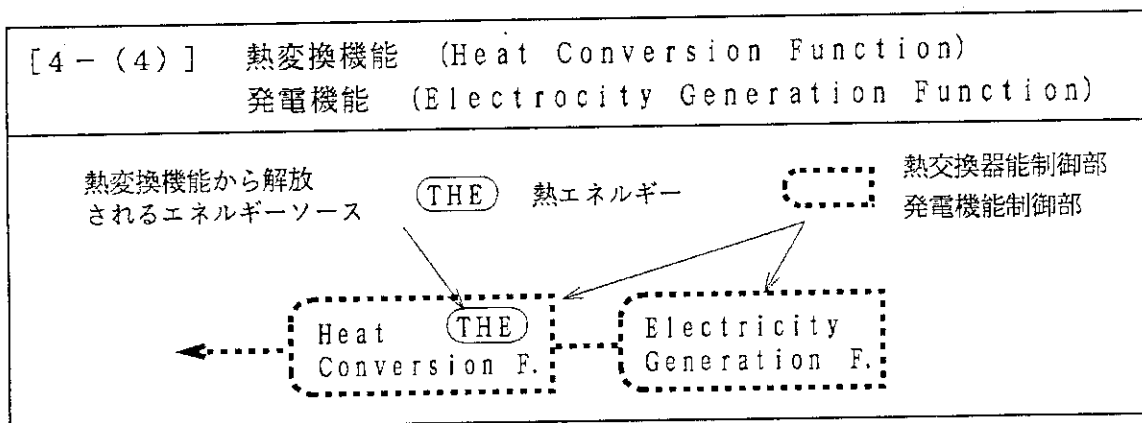


Fig. 3.4-(4)  
Mass and Energy Flows related to Heat Conversion Function

### 3.4.2 冷却材エリアにおける異常事象の抽出

冷却材エリアにおける異常事象の抽出過程をTable 3-4に示す。Table 3-4に示した冷却材エリアにおける異常事象には以下のものがある。

- Temperature - Pressure Increase
- Pressure Increase
- Loss of Coolant

Table 3-4 Abnormal Events in the Coolant Area related System Element

Abnormal Event : Abnormal Condition of System elements	Cause : Abnormal Event Initiator	Abnormal Flows : Mass and/or Energy Flows induced by Causes	Response of System elements			
			Influenced Elements	Effect on RI Controllability	Possible Next Event Initiator	Induced Abnormal Conditions
Temperature - Pressure Increase	1. Control Failure of Material Circulation Function	Cause 1 = ME34 Flow Cause 2 = TH50 Flow Cause 3 = TH14, TH47 Cause 4 = TH47 Flow	CO Boundary	—	CO-BF →En20	(AC) Loss of Coolant (AO) Coolant Release
	2. Control Failure of Heat Conversion Function		VC Boundary	—	VC-BF →En5	(AC) Loss of Coolant (AV) Coolant Inleakage
	3. (AV) Plasma Power Excursion		BC Boundary	—	BC-BF →En17	(AC) Loss of Coolant (AB) Coolant Inleakage
	4. (AB) Temp. - Press. Increase		→ Induced Abnormal Flows TH14, 47, 49 ME8, 32, 33			



Table 3-4 Contd.

Abnormal Event	Cause	Abnormal Flows	Response of System elements		
			CO Boundary	VC Boundary	BC Boundary
Pressure Increase	Mechanical Energy Release from Material Circulation Function	Cause = ME34 Flow →Induced Abnormal Flows ME8, 32, 33	CO-BF →En20	(AC) Loss of Coolant (AO) Coolant Release	
			VC-BF →En5	(AC) Loss of Coolant (AV) Coolant Inleakage	
			BC-BF →En17	(AC) Loss of Coolant (AB) Coolant Inleakage	
Loss of Coolant	1. CO Boundary Failure 2. VC Boundary Failure 3. BC Boundary Failure	Cause 1 = En20 Cause 2 = En5 Cause 3 = En17 →Induced Abnormal Flows TH14, 47, 49 ME8, 32, 33	CO-BF →En20 ( excepting Cause 1 )	(AO) Coolant Release	
			VC-BF →En5 ( excepting Cause 2 )	(AV) Coolant Inleakage	
			BC-BF →En17 ( excepting Cause 3 )	(AB) Coolant Inleakage	

### 3.5 廃棄物エリアに関連するエネルギー・物質フロー

#### 3.5.1 廃棄物エリアに属するシステム構成要素

廃棄物エリアはシステム内で生じた廃棄物の処理・貯蔵を主に行うエリアであり、属するシステムとして以下のものを考える。

- (1) 廃棄物エリア空間
- (2) WO物質バウンダリ
- (3) 廃棄物貯蔵機能 ..... a) 機能制御部  
b) 内部廃棄物貯蔵物質

(FW物質バウンダリ、廃棄物処理機能については3.1.2で既述)

廃棄物エリアは、燃料エリアとの間に通常運転時に物質（廃棄物）フローが廃棄物処理機能の制御下で形成されており、通常運転時にも制御された物質フローが形成されている物質バウンダリとして、FWバウンダリが設定される。また、隣接している格納エリアとの間にWOバウンダリが設定されている。残りの3エリアとは隣接していないので、この2つの物質バウンダリが廃棄物エリアの空間配置を決定している。

これらのシステム構成要素の空間配置とRIソース、エネルギーソースの分布をまとめると、Fig. 3-5 のようになる。

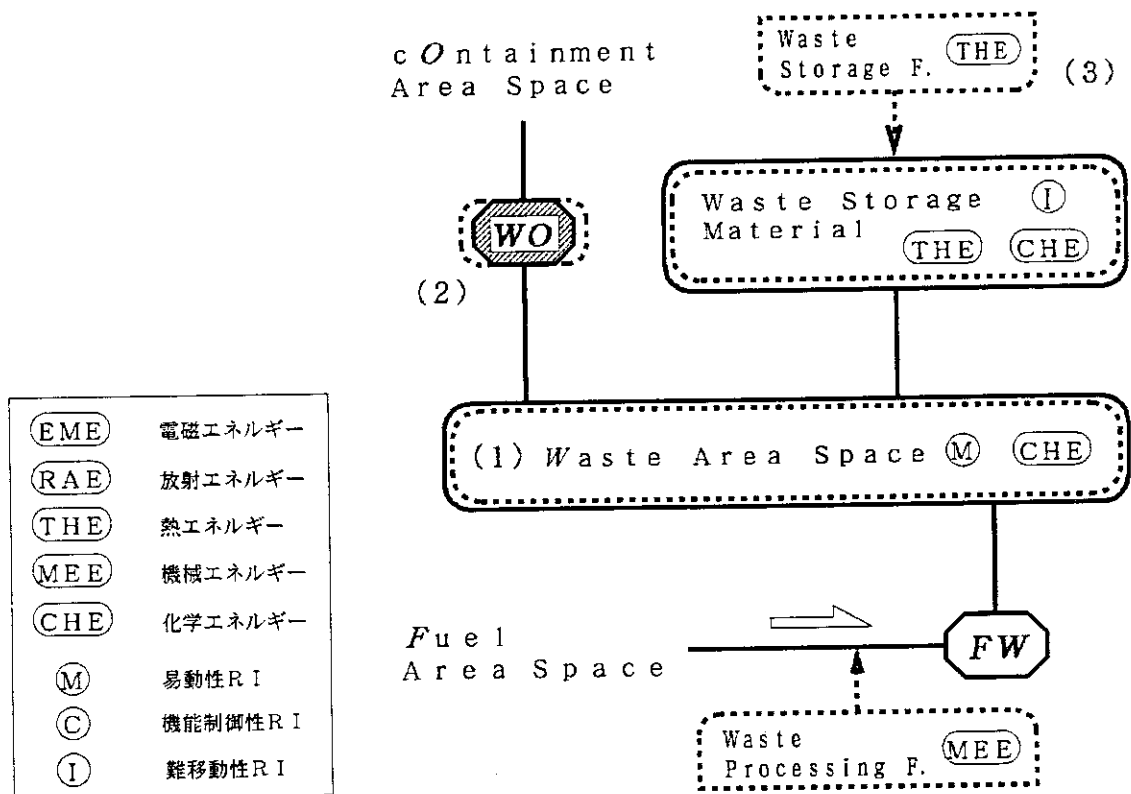


Fig. 3-5 System Elements related to Waste Area

この図によると、異常の進展において、廃棄物エリア内の「守るべき」アイテムである「R I 制御性」は、廃棄物貯蔵機能内部廃棄物貯蔵物質の状態異常により損なわれる可能性がある（R I の移動化）。また、「バウンダリ健全性」についても、物質バウンダリやエリア空間の状態異常により損なわれる可能性がある（物質バウンダリ破損）。

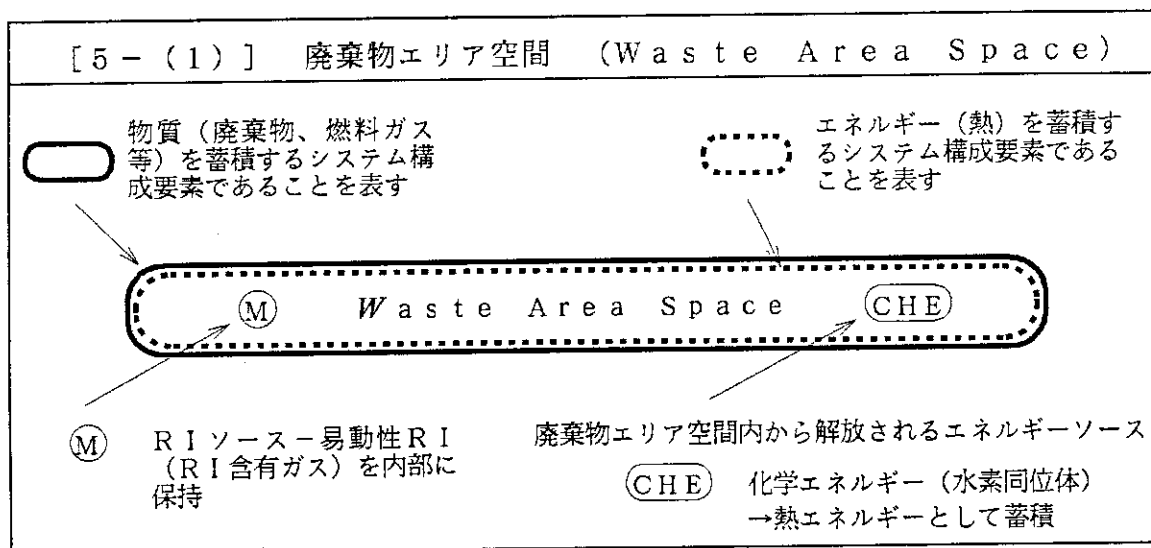
さらに、廃棄物貯蔵物質や廃棄物エリア空間内気体の異常化学反応によって新たな異常エネルギーフローを形成する可能性がある（エネルギーの異常解放）。

以下に各システム構成要素に関連のあるエネルギー・物質フローをまとめる。

### 5-(1) 廃棄物エリア空間

廃棄物エリア空間は廃棄物エリア物質バウンダリによって閉じられている空間である。この空間は内部に易動性R I（R I 含有ガス）を保持しており、物質バウンダリの破損による空気の流入が起こると、内部に含まれている水素同位体が条件によっては燃焼反応を起こし、化学エネルギーソースが解放されることになる。また、この空間は熱エネルギーを蓄積するシステム構成要素であり、蓄積量によっては温度あるいは圧力上昇による燃料バウンダリ破損を招く可能性がある（Table 3.5-(1) 参照）。そこで、事象の進展に影響を与える廃棄物エリア空間の状態変化を解析するために、廃棄物エリア空間に関連のある物質（含R I）フローとエネルギーフローを明確にする必要がある。

Table 3.5-(1) Symbols of Waste Area Space in the system model



そこで、廃棄物エリア空間と他のシステム構成要素との間の通常・異常時のフローを以下にまとめた（Fig. 3.5-(1) 参照）。

熱エネルギーフローは、廃棄物エリア空間に関連するものは、エリア空間と廃棄物貯蔵機能内部廃棄物貯蔵物質、物質バウンダリWOとの間に、TH52, 53 が形成されている。

機械エネルギーフローとしては、ME26, 27 がそれぞれ物質バウンダリFW、WOへの圧

力負荷として形成されている。

化学エネルギーフローは、まず空間内部の化学エネルギーソース（水素同位体）は燃焼反応により熱エネルギーとしてそのまま内部に蓄積される。廃棄物貯蔵機能内部廃棄物貯蔵物質の異常化学反応により、物質フローを伴って CH6が形成される。

物質フローは、廃棄物貯蔵物質と廃棄物エリア空間との間に形成されている (M13)。

エネルギーを伴う物質フローは、通常運転時においては、燃料エリア空間との間に定常のフロー(En14)が形成されている。異常時には、物質バウンダリ (FW、WO) の破損によって En14, 16が形成される。

このように、廃棄物エリア空間は事象シーケンス上で、他のシステム構成要素との間に形成されるフローの異常による状態異常が物質バウンダリ (FW、WO) の破損、機能内部物質のエネルギー異常解放を引き起こし、新たにフローが形成される。

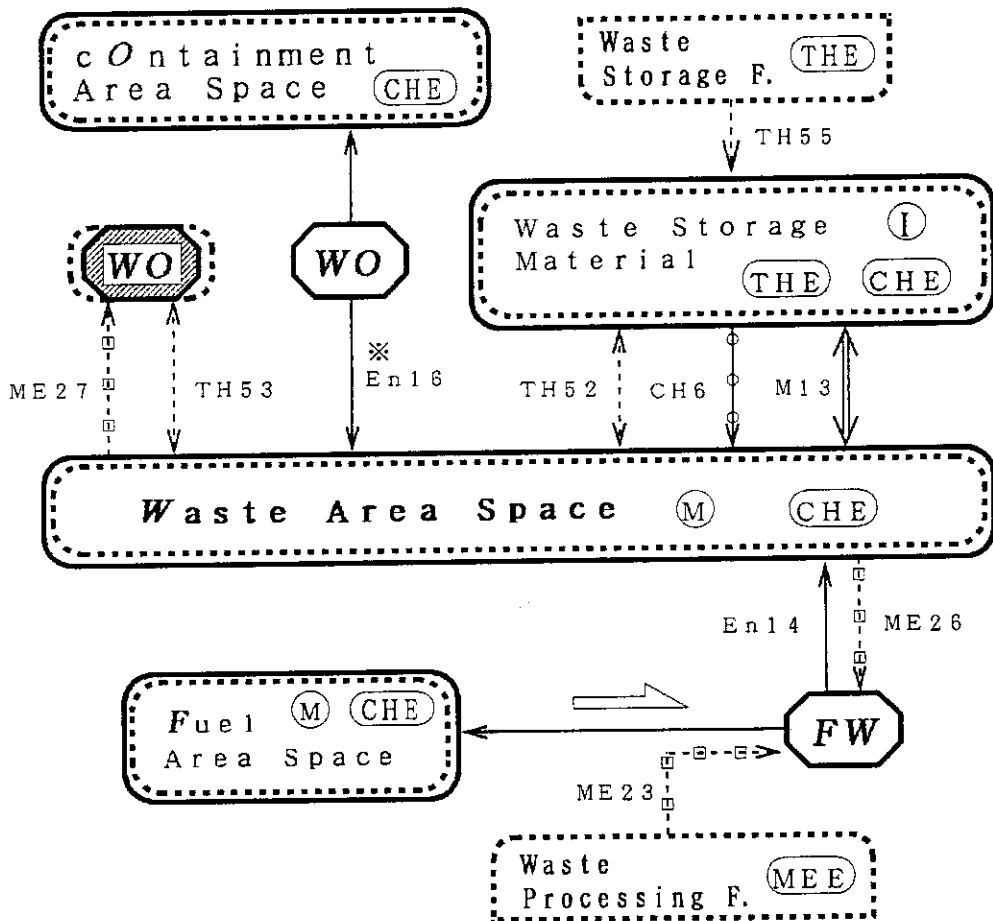


Fig. 3. 5- (1) ※ ... 破損時にのみ形成  
Mass and Energy Flows related to Waste Area Space

廃棄物エリア空間に関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下のようになる。

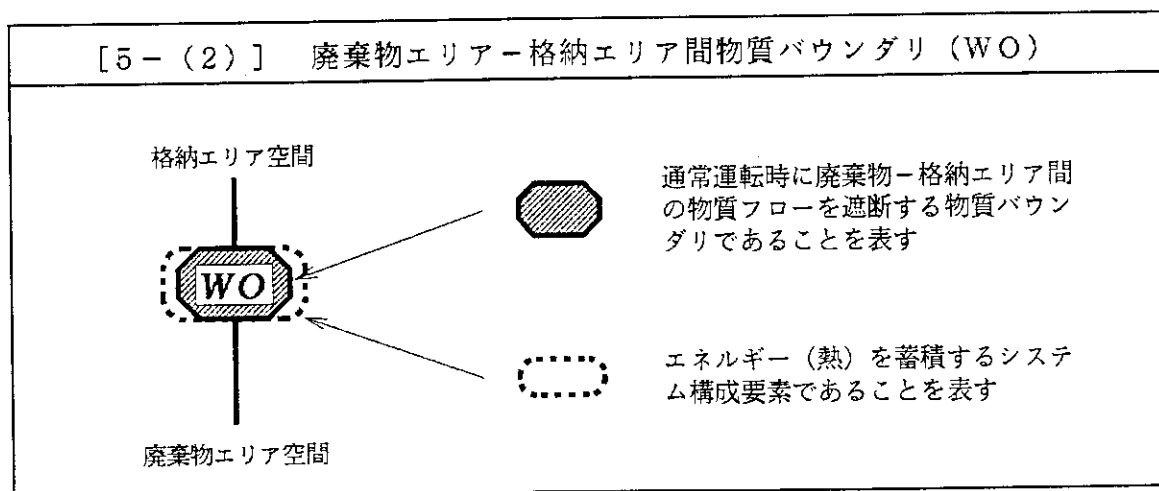
- ・熱エネルギーフロー
  - TH52 廃棄物エリア空間と廃棄物貯蔵物質との間に形成される熱伝達によるフロー
  - TH53 廃棄物エリア空間とWOとの間に形成される熱伝達によるフロー
- ・機械エネルギーフロー
  - ME26 廃棄物エリア空間のFWへの圧力負荷を表すフロー
  - ME27 廃棄物エリア空間のWOへの圧力負荷を表すフロー
- ・化学エネルギーフロー
  - CH6 廃棄物貯蔵物質の異常化学反応によるフロー
- ・物質フロー
  - M13 廃棄物貯蔵物質との間の吸収/脱離現象によるフロー
- ・エネルギーを伴う物質フロー
  - En14 (通常運転時) 廃棄物処理機能の制御による輸送粒子のフロー  
(FW破損時) 燃料エリア-廃棄物エリア空間間の物質移動によるフロー
  - En16 WO破損時の廃棄物エリア-格納エリア空間間の物質移動によるフロー

5-(2) WOバウンダリ (廃棄物-格納エリア間物質バウンダリ)

WOバウンダリは廃棄物エリア空間と格納エリア空間との間の物質境界であり、通常運転時には両空間の物質フローを遮断している。

WOは、エリア側面のRIインベントリが無視できると考え、RI保持を仮定していない。また、エネルギーに関しては、熱エネルギーを蓄積するシステム構成要素であると考え、蓄積変化は、WO温度の状態変数の変化によって判る (Table 3.5-(2)参照)。

Table 3.5-(2) Symbols of WO Boundary in the system model



このバウンダリの状態異常によっては、WOバウンダリ破損(=バウンダリ健全性の喪失)が起こる。従って、WOバウンダリの状態変化に影響するエネルギーフローについて以下に述べることにする (Fig. 3.5-(2) 参照)。

熱エネルギーフローとしては、常に形成されているフローとして、エリア空間(廃棄物、格納)との間の熱伝達によるものが考えられる (TH33, 34)。

機械エネルギーフローは、WOバウンダリ健全時に、エリア空間(廃棄物、格納)の圧力負荷によるものを考える (ME27, 28)。

エネルギーを伴う物質フローとしては、WOバウンダリ破損時に、廃棄物エリア空間と格納エリア空間との間の物質移動により形成されるフローが考えられる (En16)。

また、WOバウンダリは、バウンダリの状態異常に起因した熱的な影響(温度上昇)や機械的な影響(熱応力・廃棄物エリア空間圧力・格納エリア空間圧力等による応力増大)が限界を越えた場合にバウンダリ破損を起こし、リークパスを形成する。

WOバウンダリは事象シーケンス上で、他のシステム構成要素との間に形成されるフローの変化により、WOバウンダリ破損を起こして、更にフローを変化させる。

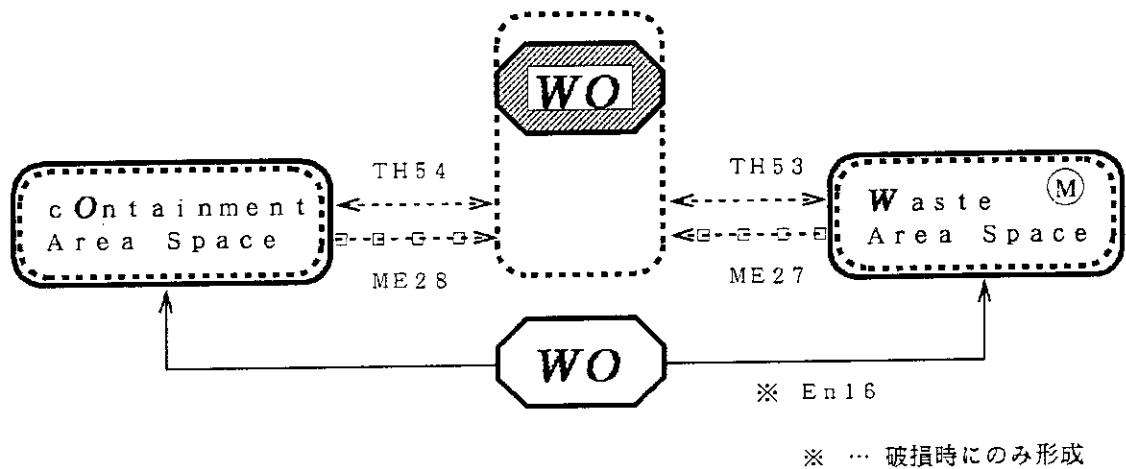


Fig. 3.5-(2) Mass and Energy Flows related to WO Boundary

これらのWOバウンダリに関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下のようなになる。

・熱エネルギーフロー

TH33 WOと廃棄物エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー

TH34 WOと格納エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー

・機械エネルギーフロー

ME27 WOへの廃棄物エリア空間の圧力負荷を表すフロー

ME28 WOへの格納エリア空間の圧力負荷を表すフロー

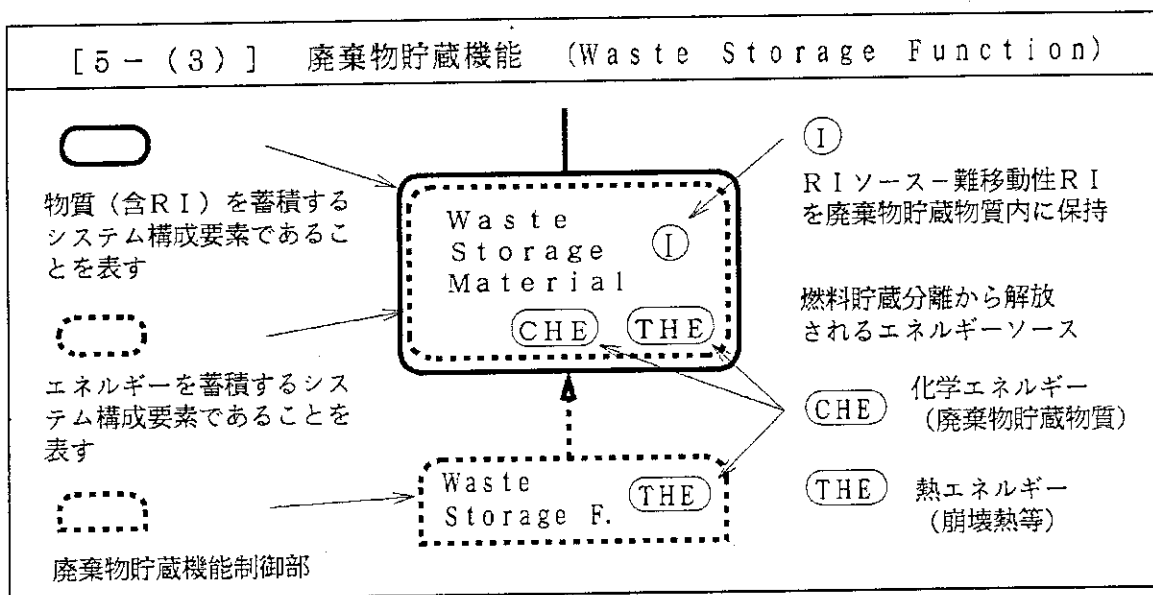
・エネルギーを伴う物質フロー

En16 W O破損時の廃棄物エリア空間-格納エリア空間間の物質移動によるフロー

5-(3) 廃棄物貯蔵機能

廃棄物貯蔵機能は、廃棄物処理機能によって燃料エリア空間から輸送された廃棄物あるいは分解保守時に得られた廃棄物を一時貯蔵する機能である。本機能は、廃棄物貯蔵機能制御部、機能内部廃棄物貯蔵物質に分解される (Table 3.5-(3)参照)。

Table 3.5-(3) Symbols of Waste Storage Function in the system model



廃棄物貯蔵機能に関連しているエネルギー・物質フローには以下のようなフローが考えられる (Fig. 3.5-(3) 参照)。

熱エネルギーフローとしては、廃棄物貯蔵機能制御部による温度制御が廃棄物貯蔵物質に形成されている (TH55)。また、廃棄物エリア空間との熱伝達によるフローが廃棄物貯蔵物質に常時形成されている (TH52)。

物質フローは、廃棄物貯蔵物質の蓄積熱エネルギー量や燃料エリア空間内圧力の変化により廃棄物貯蔵物質内の吸収/脱離現象 (含R I) によるものが考えられる (M13)。

化学エネルギーフローは、異常化学反応 (燃焼反応) によるフローを廃棄物貯蔵物質より廃棄物エリア空間内に考える (CH6)。

廃棄物貯蔵機能は事象シーケンス上で、初期異常起因として「機能制御異常」、初期異常起因あるいは二次的な異常起因として「廃棄物貯蔵機能内部廃棄物貯蔵物質化学エネルギー異常解放」を考える。

廃棄物貯蔵機能に関連するエネルギー・物質フローを改めて以下のようにまとめる。

- ・ 熱エネルギーフロー
  - TH52 廃棄物貯蔵物質と廃棄物エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー
  - TH55 機能制御部の廃棄物貯蔵物質温度制御により形成されるフロー
- ・ 化学エネルギーフロー
  - CH6 廃棄物貯蔵物質の異常化学反応によるフロー
- ・ 物質フロー
  - M13 廃棄物貯蔵物質と廃棄物エリア空間間の吸収／脱離現象によるフロー

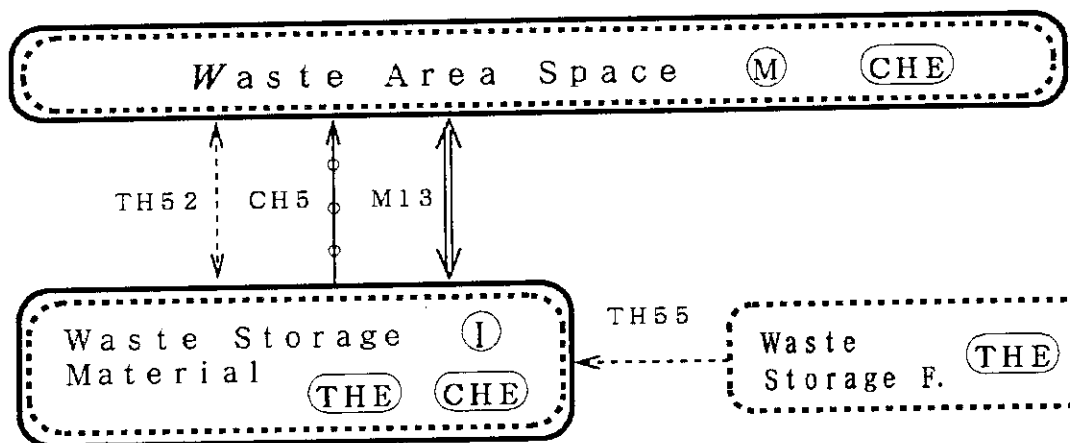


Fig. 3. 5- (3)

Mass and Energy Flows related to Waste Storage Function

### 3. 5. 2 廃棄物エリアにおける異常事象の抽出

廃棄物エリアにおける異常事象の抽出過程をTable 3-5に示す。Table 3-5に示した廃棄物エリアにおける異常事象には以下のものがある。

Temperature - Pressure Increase

Air Inleakage



Table 3-5 Abnormal Events in the Waste Area related System Element

Abnormal Event : Abnormal Condition of System elements	Cause : Abnormal Event Initiator	Abnormal Flows : Mass and/or Energy Flows induced by Causes	Response of System elements				
			Influenced Elements	Effect on RI Controllability	Possible Next Event Initiator	Induced Abnormal Conditions	
Temperature - Pressure Increase	1. Control Failure of Waste Processing Function 2. Control Failure of Waste Storage Function 3. Chemical Energy Release from Waste Storage Material 4. FW Boundary Failure	Cause 1 = En14 Flow Cause 2 = TH55 Flow Cause 3 = CH6 Flow Cause 4 = En14 Flow → Induced Abnormal Flows TH52, 53 ME26, 27	WO Boundary	—	WO-BF →En16	(AW) Air Inleakage (AO) Pressure Increase (AO) Hydrogen Release	
			FW Boundary	—	FW-BF (except Cause 3) →En14	(AF) Pressure Increase	
			Waste Storage Material	Mobilization of I. RI = M13	—	—	—
			AO Space	Move of M. RI (AW)	—	(AC) Hydrogen Release	
Air Inleakage	WO Boundary Failure	Cause = En16 Flow → Induced Abnormal Flows TH52, 53 ME26, 27	AW Space	Move of M. RI (AW)	Space-CHER	(AW) Temp. - Press. Increase	
			Waste Storage Material	Mobilization of I. RI = M13	WS-CHER →CH6	(AW) Temp. - Press. Increase	

### 3.6 格納エリアに関連するエネルギー・物質フロー

#### 3.6.1 格納エリアに属するシステム構成要素

格納エリアはこれまで挙げたエリアを格納するエリアであり、属するシステムとして以下のものを考える。

- (1) 格納エリア空間
  - (2) OE物質バウンダリ
- (VO、FO、BO、CO、WO、磁場形成機能については、3.1.1～5で既述)

格納エリアは他のエリアや外部環境と隣接し、通常運転時において、これらのエリアとの間の物質フローは遮断されている。従って、格納エリアは他のエリアや外部環境との間に設けられた6つの物質バウンダリ(OE、VO、CO、BO、FO、WO)によって空間位置が決定されている。

これらのシステム構成要素の空間配置とRIソース、エネルギーソースの分布をまとめると、Fig. 3-6 のようになる。格納エリアは核融合システム最外の領域であり、OE物質バウンダリは核融合システムと外部環境との間の境界をなす最外バウンダリとなっている。

実際の設計における格納系には、様々な機能(トリチウム除去、負圧維持、温度・湿度調整等)が設備され、格納も部屋あるいは建屋によって分割格納されるオプションが存在する。ここでのシステムモデルでは、包括的なシステム表現として一括格納により格納エリアを表現する。

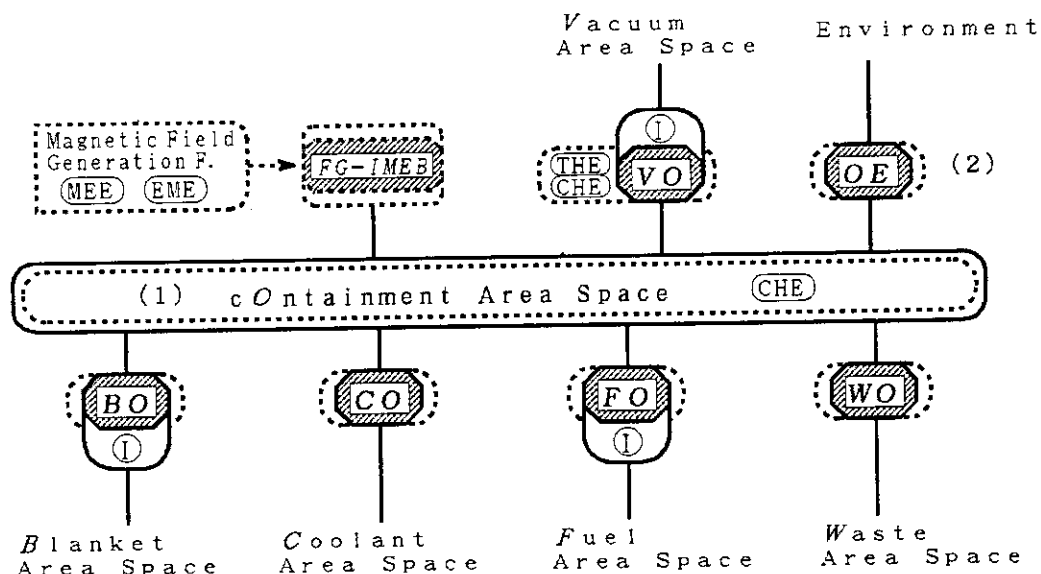


Fig. 3-6  
System Elements related  
to Containment Area

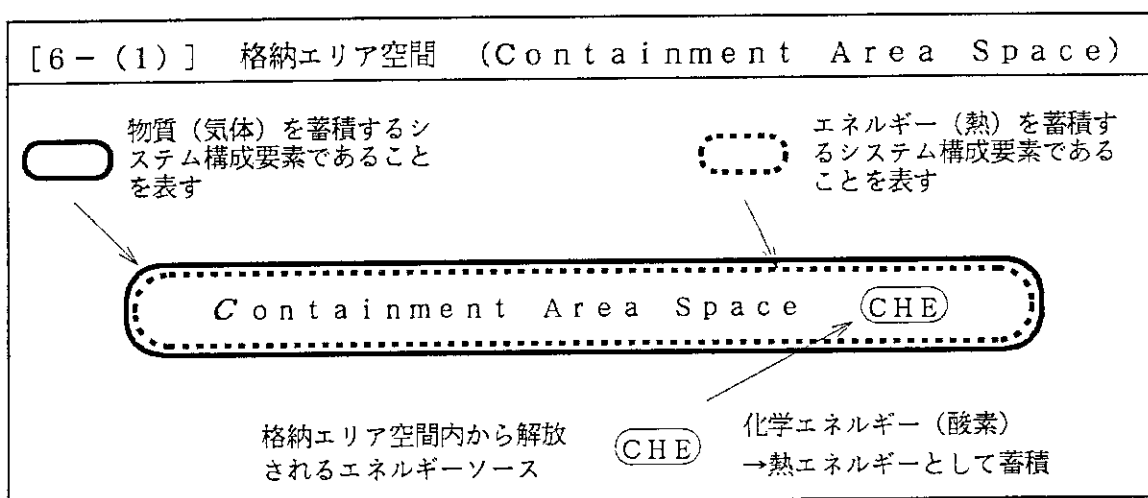
(EME)	電磁エネルギー	(MEE)	機械エネルギー	(M)	易動性RI
(RAE)	放射エネルギー	(CHE)	化学エネルギー	(C)	機能制御性RI
(THE)	熱エネルギー			(I)	難移動性RI

以下に各システム構成要素に関連のあるエネルギー・物質フローをまとめる。

6-(1) 格納エリア空間

格納エリア空間は格納エリア物質バウンダリによって閉じられている空間である。この空間は熱エネルギーを蓄積するシステム構成要素であり、さらに空間内を不活性ガスで充填しない場合は、物質バウンダリの破損によって他エリア内部の物質と雰囲気内の酸素が接触すると、接触物質の条件によっては異常な燃焼反応を起こし、化学エネルギーソースが解放されることになる (Table 3.6-(1) 参照)。

Table 3.6-(1) Symbols of Containment Area Space in the system model



次に、格納エリア空間と他のシステム構成要素との間の通常・異常時のフローを以下にまとめた (Fig. 3.6-(1) 参照)。

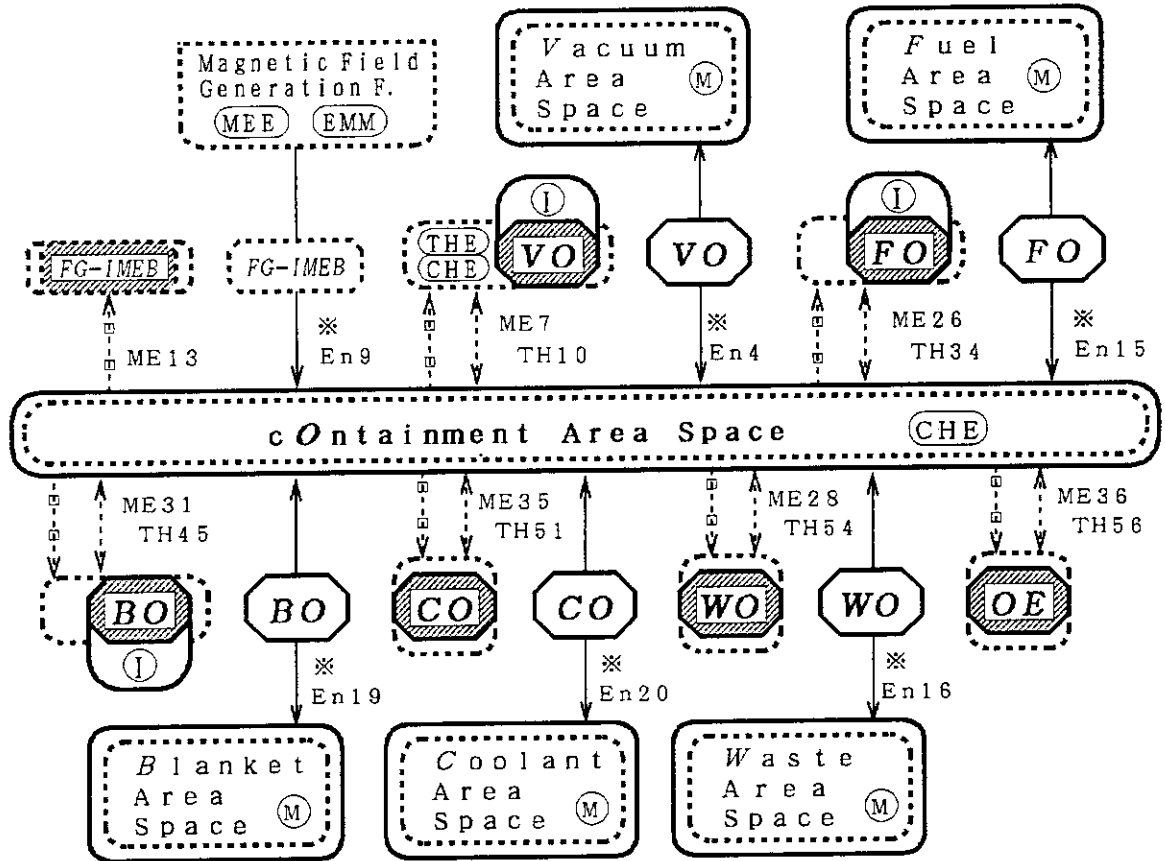
熱エネルギーフローとしては、エリア空間と物質バウンダリ (VO、FO、BO、CO、WO、OE) との間にそれぞれ、TH10, 34, 45, 51, 54, 56 が形成されている。

機械エネルギーフローとしては、物質バウンダリ健全時には、物質バウンダリ (VO、FO、BO、CO、WO、OE) と磁場形成機能内部機械エネルギーバウンダリ (FG-IMEB) への圧力負荷としてそれぞれ ME7, 26, 31, 35, 28, 36, 13が形成されている。

化学エネルギーフローは、格納エリア内部物質と反応可能性のある他エリア内物質が接触するエリアで形成され、熱エネルギーとしてそのまま反応エリア内部に蓄積される。

エネルギーを伴う物質フローとしては、異常時に物質バウンダリ (VO、FO、BO、CO、WO) の破損あるいはエネルギーバウンダリ (FG-IMEB) の破損によってそれぞれ、En4, 15, 19, 20, 16, 9 が形成される。

格納エリア空間は事象シーケンス上で、バウンダリ (VO、FO、BO、CO、WO) 破損や (FG-IMEBの破損による) 機械エネルギー解放によって形成されるフローが変化する。



※ … 破損時のみ形成

Fig. 3.6-(1)

Mass and Energy Flows related to Containment Area Space

ここで、格納エリア空間に関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下のようになる。

・熱エネルギーフロー

- TH10 格納エリア空間とVOとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH34 格納エリア空間とFOとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH45 格納エリア空間とBOとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH51 格納エリア空間とCOとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH54 格納エリア空間とWOとの間に形成される熱伝達によるフロー
- TH56 格納エリア空間とOEとの間に形成される熱伝達によるフロー

・機械エネルギーフロー

- ME7 格納エリア空間のVOへの圧力負荷を表すフロー
- ME13 格納空間の圧力負荷により形成されるFG-IMEBへのフロー
- ME26 格納エリア空間のFOへの圧力負荷を表すフロー
- ME28 格納エリア空間のWOへの圧力負荷を表すフロー

- ME31 格納エリア空間のBOへの圧力負荷を表すフロー
- ME35 格納エリア空間のCOへの圧力負荷を表すフロー
- ME36 格納エリア空間のOEへの圧力負荷を表すフロー

・エネルギーを伴う物質フロー

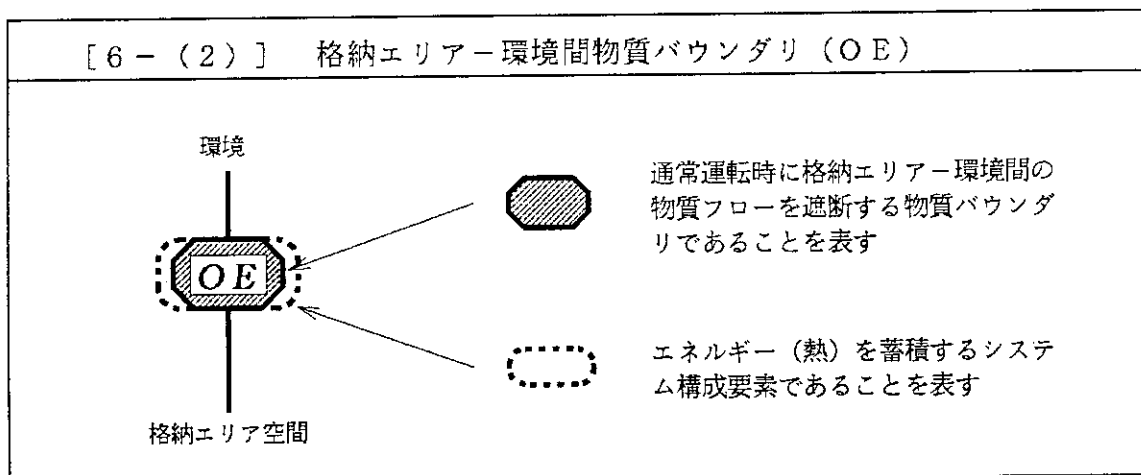
- En4 VO破損時の格納エリアー真空エリア空間間の物質移動によるフロー
- En9 FG-IMEB破損時に格納エリア空間に流入する流体によるフロー
- En15 FO破損時の格納エリアー燃料エリア空間間の物質移動によるフロー
- En16 WO破損時の格納エリアー廃棄物エリア空間間の物質移動によるフロー
- En19 BO破損時の格納エリアーブランケットエリア空間間の物質移動によるフロー
- En20 CO破損時の格納エリアー冷却材エリア空間間の物質移動によるフロー

6-(2) OEバウンダリ (格納エリアー環境間物質バウンダリ=最外バウンダリ)

OEバウンダリは格納エリア空間と外部環境間の物質境界であり、核融合システムの最外バウンダリとなっている。OEは、熱エネルギーを蓄積するシステム構成要素であると考え (Table 3.6-(2) 参照)。

OEバウンダリの破損は、VO、FO、BO、CO、WOの破損を伴った場合にはRIの環境への放出となり、破損後のシーケンスは本解析モデルでは考えない。

Table 3.6-(2) Symbols of OE Boundary in the system model



OEバウンダリに関連するエネルギーフローは、格納エリア空間、外部環境との間に熱伝達による熱エネルギーフロー (TH56, 57)と、それぞれの空間からの圧力負荷による機械エネルギーフロー (ME36, 37)が考えられる (Fig. 3.6-(2) 参照)。

これらのOEバウンダリに関連のあるエネルギー・物質フローを改めてまとめると以下のようなになる。

・熱エネルギーフロー

TH56 O Eと格納エリア空間との間に形成される熱伝達によるフロー

TH57 O Eと外部環境雰囲気との間に形成される熱伝達によるフロー

・機械エネルギーフロー

ME36 O Eへの格納エリア空間の圧力負荷を表すフロー

ME37 O Eへの外部環境の圧力負荷（大気圧）を表すフロー

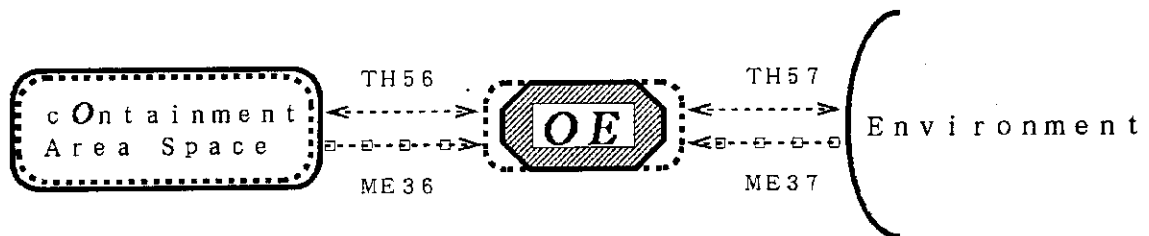


Fig. 3. 6- (2) Mass and Energy Flows related to OE Boundary

3. 6. 2 格納エリアにおける異常事象の抽出

格納エリアにおける異常事象の抽出過程をTable 3-6に示す。Table 3-6に示した格納エリアにおける異常事象には以下のものがある。

- Magnetic Field Transient
- Pressure Increase
- Hydrogen Release
- Coolant Release

Table 3-6 Abnormal Events in the Containment Area related System Element

Abnormal Event : Abnormal Condition of System elements	Cause : Abnormal Event Initiator	Abnormal Flows : Mass and/or Energy Flows induced by Causes	Response of System elements					
			Influenced Elements	Effect on RI Controllability	Possible Next Event Initiator	Induced Abnormal Conditions		
Magnetic Field Transient	1. Control Failure of Magnetic Field Generation Function 2. Electromagnetic Energy Release from Magnetic Field Generation Function	Cause 1 = EMI Flow Cause 2 = EMI, 9~15 → Induced Abnormal Flows EMI ~21	Plasma	—	Shut Down	(AV) Plasma Disruption		
			V0 Boundary	—	V0-BF →En4	(AC) Hydrogen Release (AV) Air Inleakage		
			VC Boundary	—	VC-BF →En5	(AV) Coolant Inleakage (AC) Loss of Coolant		
			VB Boundary	—	VB-BF →En6	(AV) High Temp. Gas Inleakage (AB) Loss of High Temp. Gas		
			BC Boundary	—	BC-BF →En17	(AB) Coolant Inleakage (AC) Loss of Coolant		
			EX-IMEB	—	EX-MEER →En7, 11	(AV) Pressure Increase (AF) Pressure Increase		
			SU-IMEB	—	SU-MEER →En8, 10	(AV) Pressure Increase (AF) Pressure Increase		
			FG-IMEB	—	FG-MEER →En9	(AO) Pressure Increase		

Table 3-6 Contd.

Abnormal Event	Cause	Abnormal Flows	Response of System elements		
Pressure Increase	1. Mechanical Energy Release from Magnetic Field Generation Function 2. VO-BF by Pressure Increase (AV) 3. FO-BF by Press. Increase (AF) or Temperature -Press. Increase (AF) 4. WO-BF by Temperature -Pressure Increase (AW) 5. BO-BF by Temperature -Pressure Increase (AB)	Cause 1 = En9 Cause 2 = En4 Cause 3 = En15 Flow Cause 4 = En16 Flow Cause 5 = En19 Flow → Induced Abnormal Flows ME7, 13, 26, 28 31, 35, 36	OE Boundary	_____	_____
			Area Space related Causes (excepting Cause 1 )	Move of M. RI (Related Area)	_____
					(Related Area) Air Inleakage



Table 3-6 Contd.

Abnormal Event	Cause	Abnormal Flows	Response of System elements			
			Area Space related Causes	Move of M. RI (Related Area)	-----	(Related Area) Air Inleakage
Hydrogen Release	1. V0 Boundary Failure	Cause 1 = En4 Cause 2 = En15 Cause 3 = En16 Cause 4 = En19	A0 Space	Move of M. RI (Related Area)	Space-CHER	(A0) Hydrogen Fire
	2. F0 Boundary Failure					
	3. W0 Boundary Failure					
	4. B0 Boundary Failure	→ Induced Abnormal Flows ME7, 13, 26, 28 31, 35, 36 TH10, 34, 45 51, 54, 56				
Coolant Release	C0 Boundary Failure	Cause = En20 Flow → Induced Abnormal Flows ME7, 13, 26, 28 31, 35, 36 TH10, 34, 45 51, 54, 56	AC Space	Move of M. RI (AC)	-----	-----
			A0 Space	Move of M. RI (AC)	Space-CHER	(A0) Fire (A0) Pressure Increase

#### 4. ま と め

以上の検討によって、本報告の目的としていた定量的な安全解析に用いるシステムモデルを作成した。このシステムモデルは、一般的核融合システムが安全上「守るべき」アイテムに関連するような概念的システム構成要素から構成した。また、以降の定量的安全解析に用いるべく、これらのシステム構成要素間のエネルギー・物質の移動と蓄積プロセスを明示した。

さらに、このシステムモデルの作成とともに、今後の事象進展解析において起因事象候補となるような異常事象の抽出を行った。

このような本報告の成果により、システムモデルのエネルギー・物質フローから物質バランス式、エネルギーバランス式などの基礎方程式群からなる数学モデルを作成する見通しが得られた。今後は、数学モデルの作成から始めて、事象シーケンスにおけるシステム挙動と安全機能による効果を解析できる定量的安全解析手法の開発を進める予定である。

## 謝 辞

本研究を実施するに当たり、ご指導賜りました核融合炉システムの関泰室長、東工大原子炉研の藤家洋一教授、斉藤正樹助教授に感謝いたします。また、核融合炉システム研究室の植田脩三主任研究員を始め、核融合炉システム研究室、ITER開発室安全評価グループの方々から有意義な助言を頂いたことに謝意を表します。そして、本研究を実施するに当たり、多大なご支援を頂いた田村早苗那珂研究所長と島本進核融合工学部長に深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- [1] Horst Loffler; Accident Analysis and Safety of Future Fusion Devices, 17th SOFT Safety and Environment(1992)
- [2] I. Cook et al.; A Potential Hazard Identification Study for a Generic Fusion Reactor, AEA Fusion Report 195 SEAFP/R-1/92(1992)
- [3] 岡崎 隆司 他; 核融合実験炉施設の安全確保の一方法, JAERI-M93-112
- [4] Y. Fujii-e et al.; Safety Analysis and Evaluation Methodology for Fusion Systems, Res Mechanica Vol. 27 (1989)
- [5] T. Sawada et al.; Application of GEMSAFE to ITER and its Comparison with FER, IAEA Technical Committee Meeting on "Development in Fusion Safety" (1993)
- [6] Y. Fujii-e ; General Methodology of Safety Analysis/ Evaluation for Fusion Energy Systems (GEMSAFE) and Its Applications, Safety, Environment Impact, and Economic Prospects of Nuclear Fusion(1990)
- [7] 塩田 将司; 核融合システムに対する機能ベースの安全解析・評価手法に関する研究, 東京工業大学修士論文(1991)
- [8] J. B. Hicks; Magnet failures and hazards to the public, CLM-P736 Euratom/UKAEA Fusion Association(1985)
- [9] J. Raeder et al.; ITER SAFETY, ITER Documentantation Series, No. 36, IAEA VIENNA(1991)
- [10] D. Leger et al.; ITER FUEL CYCLE, ITER Documentantation Series, No. 31, IAEA VIENNA(1991)
- [11] 核融合炉設計及び研究開発の現状と課題 , 日本原子力学会(1983)
- [12] S. Ciattaglia et al.; Main Results of the Analysis related to a few Reference Accident Sequences of NET/ITER Tritium Systems, IAEA Technical Committee Meeting(1993)
- [13] S. J. Brereton; Tritium Systems Interactions for Systems Code Applications and Safety Analysis, EG&E Idaho Inc(1991)

## 謝 辞

本研究を実施するに当たり、ご指導賜りました核融合炉システムの関泰室長、東工大原子炉研の藤家洋一教授、斉藤正樹助教授に感謝いたします。また、核融合炉システム研究室の植田脩三主任研究員を始め、核融合炉システム研究室、ITER開発室安全評価グループの方々から有意義な助言を頂いたことに謝意を表します。そして、本研究を実施するに当たり、多大なご支援を頂いた田村早苗那珂研究所長と島本進核融合工学部長に深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- [1] Horst Loffler; Accident Analysis and Safety of Future Fusion Devices, 17th SOFT Safety and Environment(1992)
- [2] I. Cook et al.; A Potential Hazard Identification Study for a Generic Fusion Reactor, AEA Fusion Report 195 SEAFP/R-1/92(1992)
- [3] 岡崎 隆司 他; 核融合実験炉施設の安全確保の一方法, JAERI-M93-112
- [4] Y. Fujii-e et al.; Safety Analysis and Evaluation Methodology for Fusion Systems, Res Mechanica Vol. 27 (1989)
- [5] T. Sawada et al.; Application of GEMSAFE to ITER and its Comparison with FER, IAEA Technical Committee Meeting on "Development in Fusion Safety" (1993)
- [6] Y. Fujii-e ; General Methodology of Safety Analysis/ Evaluation for Fusion Energy Systems (GEMSAFE) and Its Applications, Safety, Environment Impact, and Economic Prospects of Nuclear Fusion(1990)
- [7] 塩田 将司; 核融合システムに対する機能ベースの安全解析・評価手法に関する研究, 東京工業大学修士論文(1991)
- [8] J. B. Hicks; Magnet failures and hazards to the public, CLM-P736 Euratom/UKAEA Fusion Association(1985)
- [9] J. Raeder et al.; ITER SAFETY, ITER Documentation Series, No. 36, IAEA VIENNA(1991)
- [10] D. Leger et al.; ITER FUEL CYCLE, ITER Documentation Series, No. 31, IAEA VIENNA(1991)
- [11] 核融合炉設計及び研究開発の現状と課題 , 日本原子力学会(1983)
- [12] S. Ciattaglia et al.; Main Results of the Analysis related to a few Reference Accident Sequences of NET/ITER Tritium Systems, IAEA Technical Committee Meeting(1993)
- [13] S. J. Brereton; Tritium Systems Interactions for Systems Code Applications and Safety Analysis, EG&E Idaho Inc(1991)