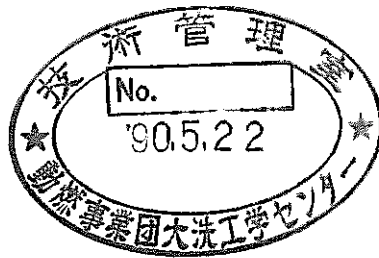


可搬型炉の開発(1)

——自律分散原子動力システムの概念検討——



1990年2月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

可搬型炉の開発(1)
—— 自律分散原子動力システムの概念検討 ——

渡辺兼秀

要 旨

鉄道システム、鉄鋼プラントシステム等の分野で実用化されている自律分散システムのデータ伝送方法を利用して、宇宙原子動力システムの概念を文献から検討した。地上ステーションと交信する2台の管理計算機と開発/バックアップ用の計算機を宇宙ステーションに置き、これらの計算機と動力システムのなかで原子炉、一次・二次熱輸送系、補助動力源、動力調整・分配系、打ち上げ船切離し、宇宙ステーション/動力システム配置を制御する合計9個のAI(人工知能)プロセッサを光ネットワークでネットワーク制御器を介して直列に接続する。

ネットワーク制御器は異常を検知し、この異常のAIプロセッサを切離す等の機能をもつので、ネットワーク上のどの部分に異常が発生しても残りの部分で伝送を続けることができ、耐故障性が向上する。光ネットのなかには各AIプロセッサの入出力・制御信号等が流れるので、故障プロセッサの機能を他のプロセッサあるいは開発/バックアップ用の計算機で代替することもできる。またオンラインパラランテスト、故障解析、開発効率の向上、計算機資源の有効利用等が期待できる。

しかし分散型計算機システムを構築する場合には、データの抽象化、ハードウェア/ソフトウェア計算資源を利用するアクセス制御、異なるOS(オペレーティングシステム)、データベース、通信プロトコルを用いることによる異方性等の研究・開発課題も一般的に指摘されている。

このため、今後実用されている自律分散システムの調査検討等を行い、この技術を宇宙動力システムに適用実現するための課題を摘出するとともに、これらの課題の解決方法を検討していく。

February, 1990

Development of Portable Reactor System (1)

—Study on Concept of Autonomous Decentralized Nuclear Power System—

Kenshiu Watanabe

ABSTRACT

Study has been done on concept of a space nuclear power system on the basis of a way of data transmission in an autonomous decentralized system shown in literatures, which is now used in a railway system or an iron refinery plant. Two supervisory computers for intercommunication between space and earth station and one computer for software system development and back-up are installed in a spacecraft, and these computer are connected through optical networks and network control processors(NCPs) to decentralized AI(Artificial Intelligence) processors which are used for control, survey and diagnosis of components in nine power subsystems: reactor, primary and secondary heat transport loop, rotation units, auxiliary power supply, power conditioning and distribution units, and separation and deployment devices.

A feature of fault tolerance in the space nuclear power system will be strengthened by using this kind of decentralized system, as no problem is produced in signal transmission even if an anomaly is produced in an AI processor. The NCP, coupled to the failed AI processor, detects generation of the defect and separates itself from the optical networks.

Signal transmission with no problem will continues between rest normal NCPs. One of normal AI processors or the back-up computer replaces an ordinary role of the failed processor by using necessity data or command which is flowing in the optical networks, for calculation to the alternation.

It is also possible for the system to carry out on-line pararan-test, easy fault analysis, system development with high efficiency and effective use of computer resources. However, the decentralized computer system is generally pointed out having problems in research and development: ways of data abstraction, of use of computer resources (hardware and software), and of access control and heterogeneity of differences in OS(Operating System), database, communication protocol. Therefore, details should be studied to realize the autonomous decentralized space nuclear power system.

目 次

1. 緒言	1
2. 宇宙原子動力システム	2
2. 1 構造	2
2. 2 運転モード	2
2. 3 宇宙原子動力システムの構造と運転モードの関係	3
3. 宇宙原子動力システムの制御	6
3. 1 制御対象	6
3. 2 制御方法	7
4. 地上炉における計算機制御の役割	13
4. 1 運転記録	13
4. 2 運転状態監視	13
4. 3 運転制御	14
5. 自律分散システム	15
5. 1 データフィールド	15
5. 2 利点	15
6. 自律分散宇宙原子動力システム	18
6. 1 必要性	18
6. 2 適用例	18
6. 3 自律型プラントの“規範”との関連	20
6. 4 検証方法	21
6. 5 基本的基準との比較	21
7. 今後の課題	25
7. 1 自律分散システムの構築条件	25
7. 2 自律分散システムの効果の示し方	25
8. 結言	27
9. 参考文献	28

表目次

表 1	動力サブシステム制御機能制御機能	8
表 2	計測点リスト	9
表 3	ハードウェア, 動力システム計算機, 地上の役割分担	22

図目次

図 1	サブシステムハードウェアの選択	4
図 2	運転モードの関係	5
図 3	一般の原子動力システムのブロック図	10
図 4	自律システムインタフェース	11
図 5	現在(非自動)動力システムのデータインタフェース	12
図 6	自律分散システム	17
図 7	自律分散宇宙原子動力システムの例	23
図 8	動力制御サブシステムAIプロセッサ	24

1. 緒言

宇宙原子動力システムの制御に集中計算機システムを利用して、宇宙船のハードウェア、ソフトウェア、インタフェースの構成を簡単にするとともにこのシステムを自律させることが文献[1]に示されている。自律を地上、人との関連なしにすべての機能を果たすことと定義している。自律期間は、最大7年の運転期間と合計10年の寿命に対して30日間である。

また月近くの原子動力システムを考えれば、地球から月までは384,400km離れているので、電波通信に片道で1.5秒以上の遅れを生じ、故障時の回復等を想定すれば遠隔制御も容易でなく(文献[2])、やはり可能な限り自律させる必要があると考える。

さらに文献[1]と異なりもう少し多くの機能を持たせた自律の定義が分子生物学をアナロジーとして提案された自律分散概念(文献[3],[4])のなかにある。自律性は、いかなるサブシステムに異常が生じても、残りのサブシステムがそれぞれ生存するために制御でき(自律可制御性)、かつ互いに協調できる(自律可協調性)ことと示されている。また自律分散システムとは、「それぞれの目的と機能をもつ自律的なサブシステムから統合されたもの」として定義されている。

これらの自律可制御性、自律可協調性は宇宙原子動力システムの安全性、信頼性、稼働率の向上を今後考えていく上で必要であると考え、ここでは宇宙原子動力システムの制御に多機能な自律分散システムの技術を適用した場合のシステムの形態、検証方法と効果を検討する。検討にあたって最初に文献[1]等から宇宙原子動力システムとこのシステムの制御、文献[3],[4]から自律分散システムの概要を示す。次に、これらの宇宙原子動力システム、システムの制御、自律分散システム関係を整理し、宇宙原子動力システムを自律分散制御する例を示す。

2. 宇宙原子動力システム

2. 1 構造

文献[1]に示されている構造を参考にしながら、現在検討している宇宙原子動力システムの例を図1に示す。宇宙原子動力システムの機能は、8個のサブシステムからなる。核、熱輸送、動力変換、動力調整、動力制御、動力分配、補助動力源、構造サブシステムである。

核サブシステムは、核分裂反応から熱エネルギーを発生し、燃料、冷却材、放射性物質からなる原子炉集合体、制御ドラム(付録1)とこれらに関連するモータ、装置類からなる原子炉制御機構、 γ 線と中性子線の遮蔽、補助停止装置、必要な核計装を含んでいる。

熱輸送サブシステムは、原子炉で発生した熱を一次系のリチウムと二次系のカリウムを用いて動力変換サブシステムまで運ぶ。そしてカリウムタービンからの排熱を宇宙へ捨てる。熱の移動には、強制対流させた液体金属とヒートパイプを用いる。このためこのサブシステムは、配管、弁、ポンプ、ヒートパイプ、熱交換器、放熱板、熱絶縁物等からなる。

動力変換サブシステムは、原子炉からの熱をカリウムタービンを用いて電気動力に変換する。動力調整サブシステムは、変換サブシステムからの電気を宇宙ステーションで利用する電圧、周波数に変換する。動力制御サブシステムは、全体動力システムを管理する。

補助動力源は、発電動力を利用できない時に動力システム管理に必要なエネルギーを供給する。この動力源は、蓄電池、太陽電池等からなる。

動力分配サブシステムは、宇宙ステーションに動力を供給する。電磁リレー、半導体、スイッチ等からなる制御装置、ヒューズ、ブレーカのような保護装置等から構成される。

構造サブシステムは、他のサブシステムの支持とこれらの機器要素からなる。動力システムを打ち上げ船から切離し、宇宙ステーションから動力システムを展開する機構も持っている。

2. 2 運転モード

文献[1]を参考にしながら、運転モードを

- (1) 打ち上げ/動力システム配置
- (2) 起動
- (3) 停止
- (4) 通常運転
- (5) 異常時運転
- (6) 休止

の6つの種類に分けてこれらの相互関係を図2に示す。打ち上げ/動力システム配置モードは、打ち上げ台での秒読みから始まり打ち上げ、打ち上げ船切離し、最終軌道への移行、宇宙ステーションからの動力システムの切離しまで、数時間から数日で

ある。起動モードは、打ち上げ／動力システム配置モード、休止モードに続く。そして起動に続いて長い運転状態の通常運転モードになる。異常時運転モードは、起動、通常運転に続く。

停止モードは、通常、異常時運転から休止にする間である。休止モードは、打ち上げ／動力システム配置、停止のモードに続く。このモードは、数日から数年続く。

2. 3 宇宙原子動力システムの構造と運転モードの関係

打ち上げ／動力システム配置モードでは、宇宙ステーションと補助動力源からの動力システム管理用の動力があるので、原子炉を動かさない。この間の動力システムの役割は、補助動力源の運転、打ち上げ船切離し、宇宙ステーション／動力システムの展開と性能監視である。

起動モードでは、原子炉と動力システムのバランスを取りながら設定の動力出力レベルにする。この間の核、熱輸送、動力変換サブシステムの性能を、厳密に監視・制御される。安定運転後は、システムは通常あるいは異常時運転モードをとる。

通常運転モードでは、動力システムは宇宙ステーションからの要求に応じて電気動力を出力する。構造以外のサブシステムは、このモードの間制御する。

異常時運転モードは、突発状態における運転、故障・劣化した動力システム機器を伴った運転を含む。

停止モードは、原子炉と動力システムの平衡状態を制御と監視が不要な“冷”状態にする。停止モードの間は、数秒から数分であろう。休止モードでは、動力システムは待機状態にある。原子炉が“冷”で動力を発生していない。動力システムの管理に必要な動力を、補助動力源から供給する。

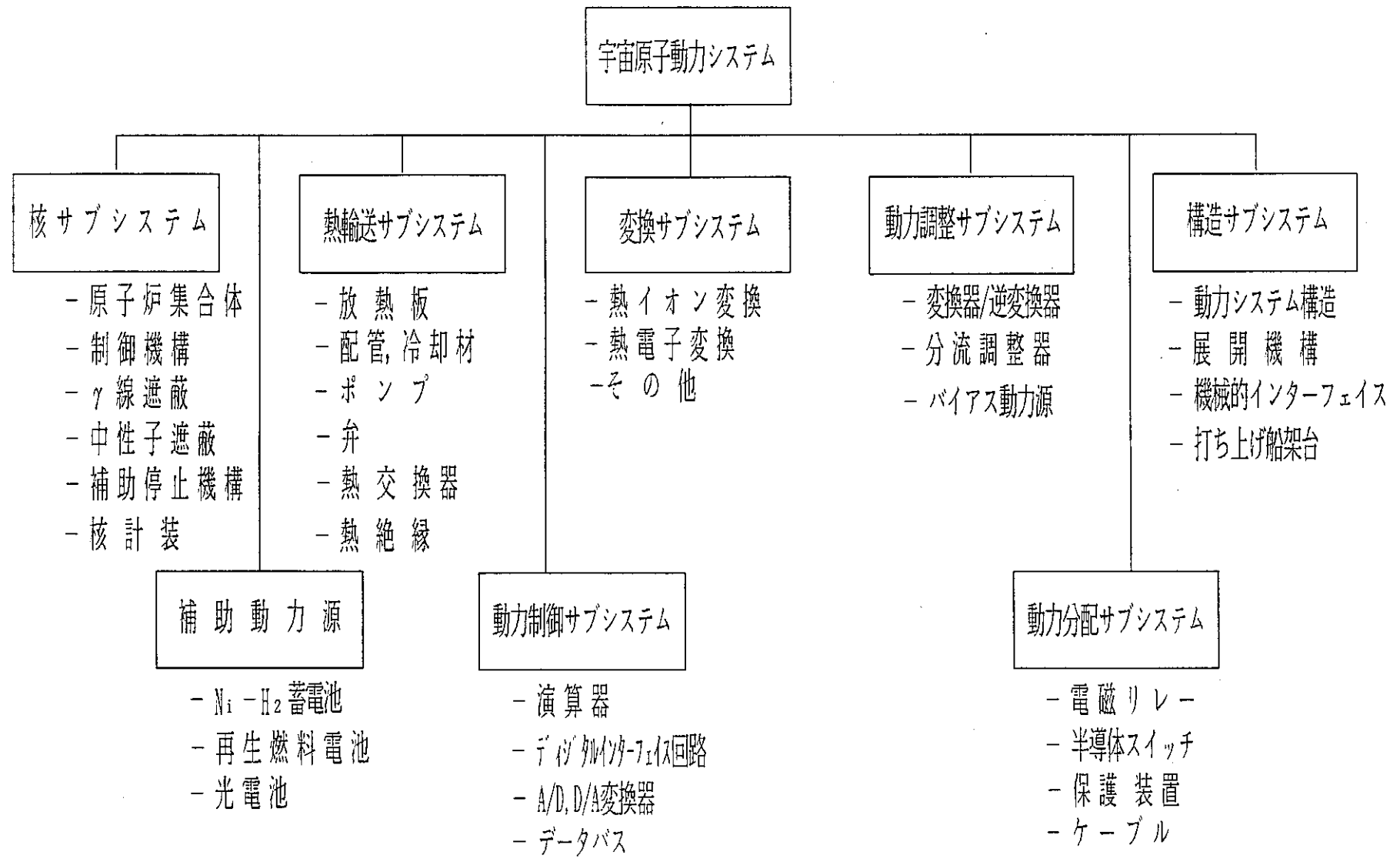


図 1 サブシステムハードウェアの選択

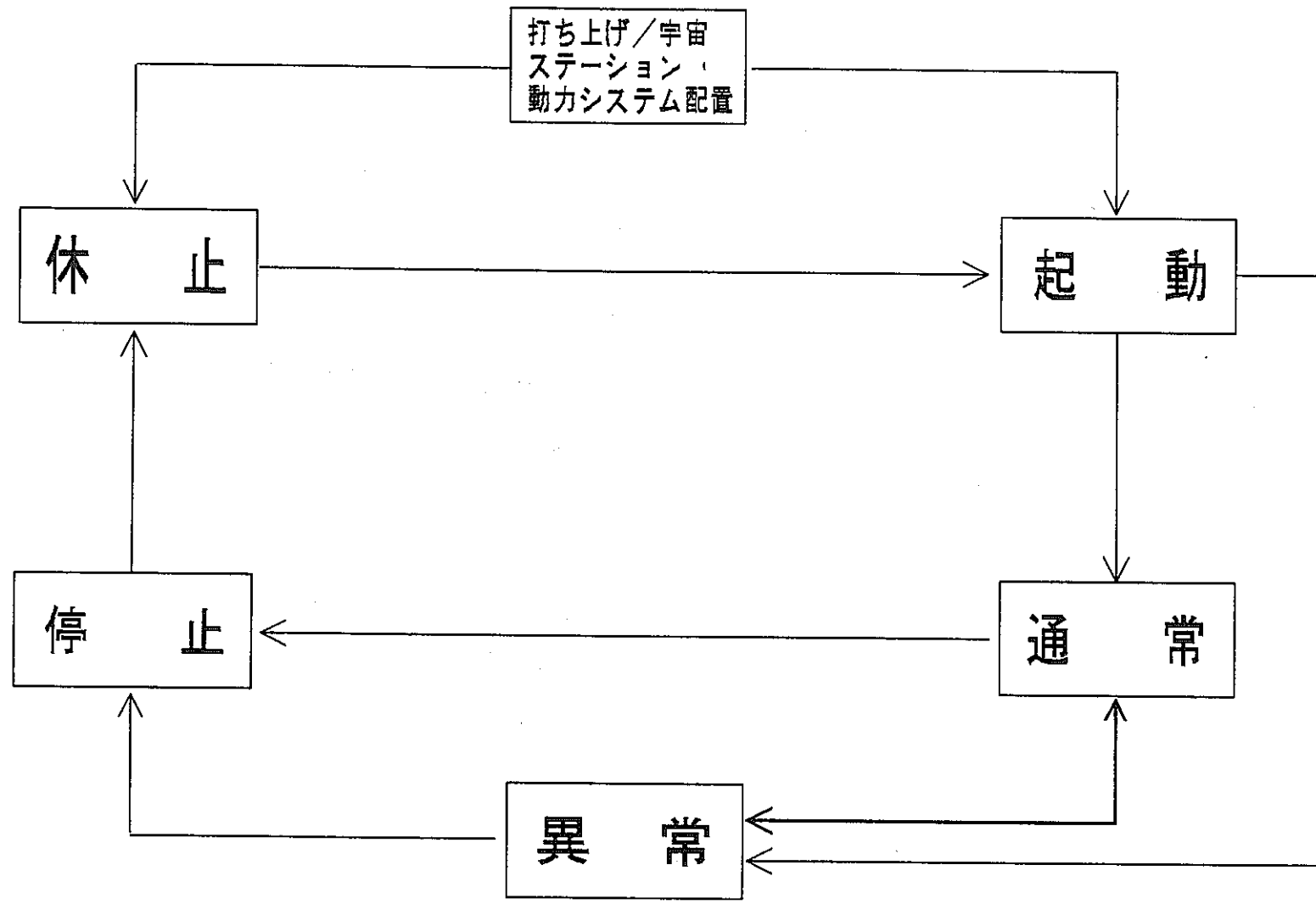


図 2 運転モードの関係

3. 宇宙原子動力システムの制御

宇宙原子動力システムの制御対象と制御例を文献[1]から示す。

3.1 制御対象

宇宙原子動力システムの9つの機能を対象とする。これらの機能を満たすための入力信号と制御信号と合わせて表1に示す。

- (1)原子炉
- (2)一次熱輸送系
- (3)二次熱輸送系
- (4)回転器
- (5)補助動力源
- (6)動力調整
- (7)動力分配
- (8)打上げ船切離し
- (9)宇宙ステーション動力の展開

の機能である。

原子炉を制御して必要な熱出力を得るのに、中性子束，制御ドラム，冷却材の温度・流量で制御ドラム駆動モータへの電気パルスを変化させる。一次熱輸送系を制御して変換器サブシステムの入口温度を設定値に保つのに、冷却材の温度・流量でポンプ動力，弁作動信号を変える。二次熱輸送系を制御して変換器サブシステムの出口温度を設定値にするのに、冷却材温度・流量，放熱器温度でやはりポンプ動力と弁作動信号を変化させる。回転機を制御して出力動力を設定値にするのに、作動流体の温度・圧力・流量，軸速度，出力動力を変化させる。補助動力源を制御して一定の補助動力を得るのに、蓄電池の電圧・電流・温度を変えて充電電圧と切換え指令を変化させる。動力調整し宇宙ステーションへ一定動力を出力するのに、変換器サブシステムの出力電圧・電流，調整出力電圧・電流を変えて切換え指令，変換器設定値を変化させる。動力分配制御をして宇宙ステーションの動力調整，動力ケーブルの保護をするのに、負荷制御指令を用いて切換え指令，スイッチ位置状態を変える。宇宙ステーションから動力システムを切離すのに、宇宙ステーション切離しシーケンスに基づいて切離し信号を出力する。動力システムの構造を展開し、最終的な宇宙ステーションと動力システムの配置にするのに、動力システム展開シーケンスと位置信号に基づいて切離し信号を出力する。

これらの9つの制御系で用いる信号の種類，数，用途(制御，監視，安全系)を表2に示す。原子炉出力信号は3個ですべての用途に用いる。動力ケーブル電圧が2個で制御と監視に用いる。冷却材流量は1個，補助動力ケーブル電圧は2個ですべての用途に用いる。放熱器温度は1個，原子炉冷却材温度，中性子束は各々2個で監視用である。

制御ドラムの位置は20個，分流器電流は9個，電子集合体温度は6個，蓄電池電圧・電流は各々2個と1個，ポンプ動力源出力電圧は2個で制御と監視に用いる。冷却材

圧力・放熱は2個と1個ですべての用途に用いる。

これらの機能をミッションと一緒に考える時に、次の因子を考慮する。

- ・ 打ち上げ船の制約
- ・ 宇宙ステーションと動力システムの付属品
- ・ 宇宙ステーション指令とデータ処理サブシステムのインタフェース
- ・ 宇宙ステーションの姿勢制御と機動性
- ・ 宇宙ステーションの耐故障性
- ・ 宇宙ステーションの熱授受
- ・ 放射線環境
- ・ 動力の品質
- ・ 宇宙ステーションの負荷分布

3. 2 制御方法

核、熱輸送、動力変換、動力調整・制御、動力分配、補助動力源、構造のサブシステムを制御する方法を図3に示す。一次と二次の熱輸送系をまとめて熱輸送系サブシステムとしている。これらのサブシステムと機能の関係を考えれば、この熱輸送サブシステムのなかに熱輸送系の機能に直接影響を与える回転機制御の機能を含めることができると思う。また、構造サブシステムのなかに打ち上げ船切離し、宇宙ステーション／動力システムの配置を含めて考えることができる。

図3のなかでは、電気動力と制御信号の流れを各々を実線と破線に分けて示した。制御方法を検討するのに破線に着目する。すべての制御信号は動力調整・制御サブシステムと直接の係わりをもつ。すなわちこの動力調整・制御サブシステムが動力システムのすべてを制御している。

指令／データサブシステム、動力サブシステム、宇宙ステーションにおける地上支援装置との間の将来における制御信号の流れを図4に示す。宇宙ステーションからの指令は動力調整ブロックに行き、動力制御ブロックの状態が宇宙ステーションに戻るだけである。また、指令／データサブシステムとの関係をみれば、入出力はやはり動力制御ブロックと関係するだけで、制御信号の流れは複雑でない。

これらの制御システムでは図5に示す現在に比べ、信号線とコネクタの重量を大きく減らすことができる。現状では制御信号の流れは複雑である。動力源、動力調整、蓄電池、動力分配、動力制御の各機能が宇宙ステーション、指令／データサブシステムと制御信号の入出をしている。このシステムの特徴は、制御／データ信号のひとつについて1本のケーブルを用いる。限られた数のデータしか宇宙ステーションで収集しない。また、性能解析は地上で行う。

表1 動力サブシステム制御機能

機 能	目 的	入 力	出 力
原子炉制御	熱出力設定	核特性 制御ドラム位置 冷却材温度 冷却材流量	制御ドラム装置モータへの電気パルス
一次熱輸送ループ制御	変換器サブシステム入口温度設定	冷却材温度 冷却材流量	ポンプ動力 弁作動信号
二次熱輸送ループ制御	変換器サブシステム出口温度設定	冷却材温度 冷却材流量 放射器温度	ポンプ動力 弁作動信号
回転機制御	出力動力設定	作動流体温度・圧力・流量 軸速度 出力動力	弁作動動力 指令信号
補助動力源制御	調整動力出力設定	蓄電池電圧・電流 蓄電池温度	充電電圧 切換え指令
動力調整制御	宇宙ステーションへの動力出力設定	変換器サブシステム出力電圧・電流 調整出力電圧・電流	切換え指令 変換器設定値
動力分配制御	宇宙ステーションへの動力制御 宇宙ステーション故障からの保護	負荷制御指令	切換え指令・スイッチ位置
切離し	宇宙ステーションから動力システムの切離し	宇宙船切離しシーケンス	切離し信号
展開制御	動力システム構造と宇宙ステーション／動力システムの配置	動力システム配置 シーケンス 位置指示	切離し信号

表2 計測点リスト

測 定	No	機 能		
		制 御	監 視	安 全
原子炉出力信号	3	×	×	×
一次動力電圧	2	×	×	
冷却材流量	1	×	×	×
補助動力電圧	2	×	×	×
放熱器温度	1		×	
原子炉冷却材温度	2		×	
中性子束	2		×	
制御ドラム位置	20	×	×	
分流器要素電流	9	×	×	
電子装置温度	6	×	×	
蓄電池電圧	2	×	×	
蓄電池電流	1	×	×	
冷却材圧力	2	×	×	×
冷却材放熱	1	×	×	×
ポンプ動力源出力電圧	2	×	×	

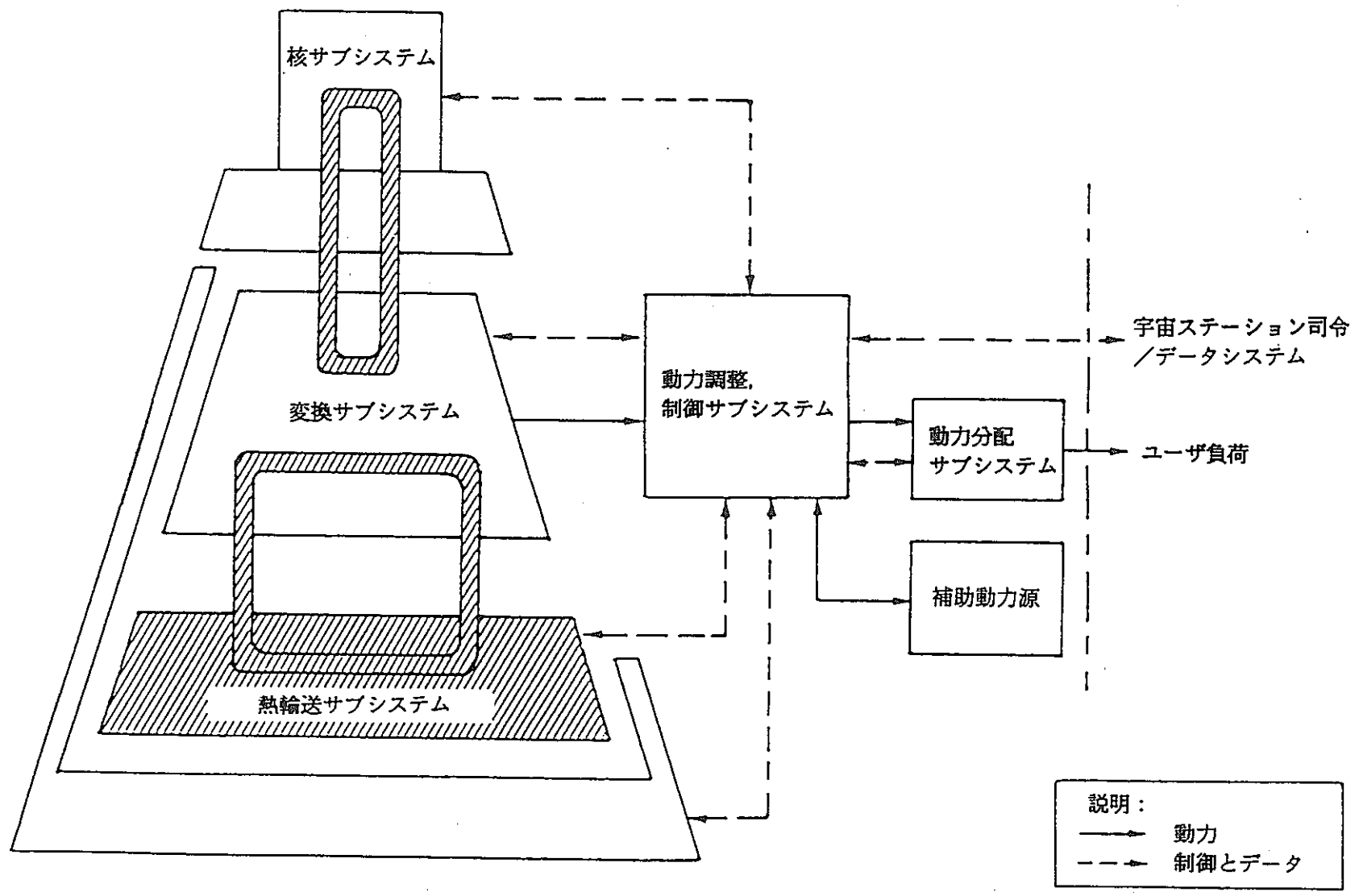
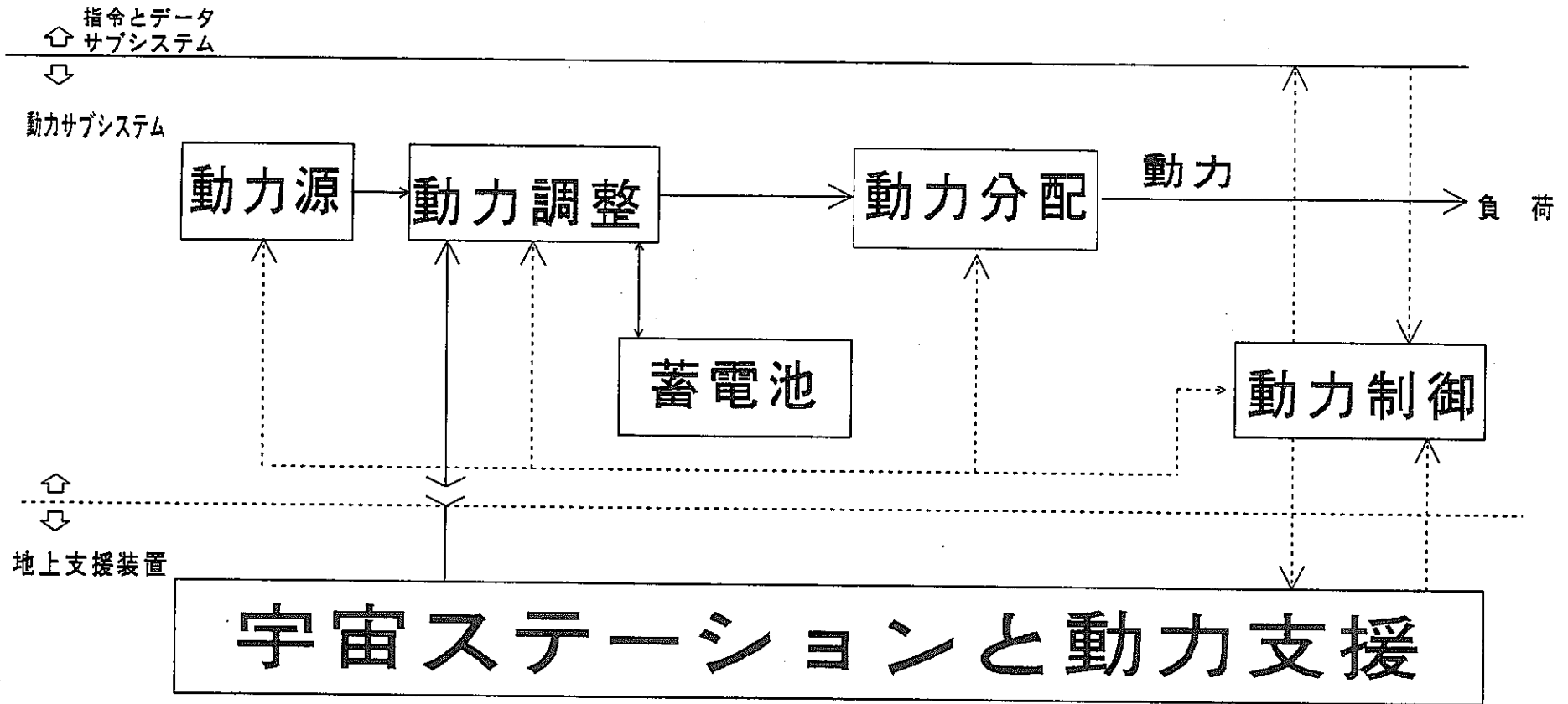
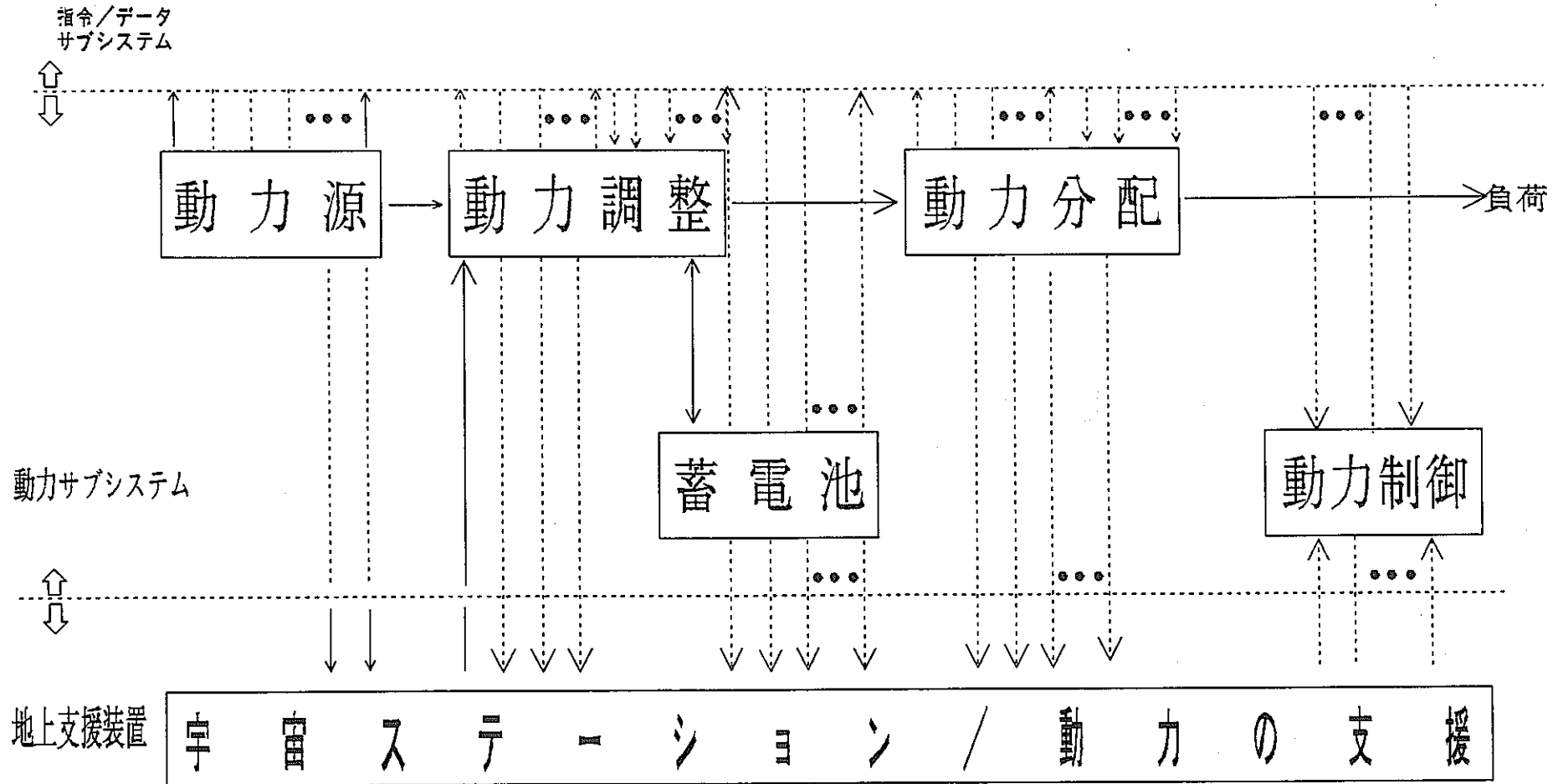


図3 一般の原子動力システムのブロック図



説明：
——→ 動力
-----→ 制御とデータ

図4 自律動力システムインターフェイス



- 12 -

特長：

- 制御/データ信号毎に1本のケーブル
- 宇宙ステーション内の限られたデータ収集
- 地上における性能分析

説明：

——→ 動力
 - - - -> 制御とデータ

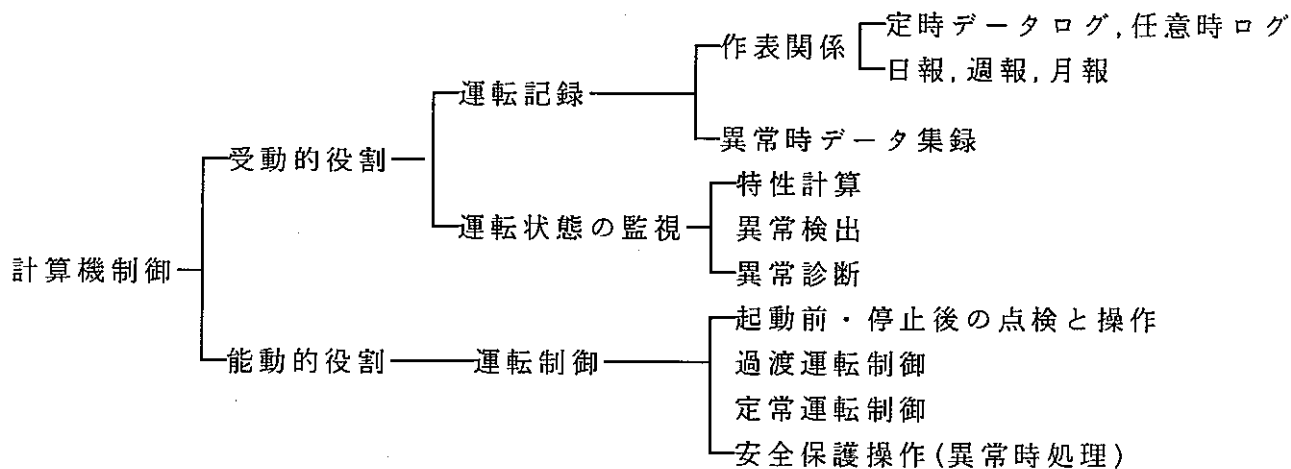
図5 現在(非自動)動力システムのデータインタフェース

4. 地上炉における計算機制御の役割

文献[5]に基づいて地上の原子炉における計算機制御の役割を整理し、これらの役割を宇宙原子動力システムに適用することを考える。計算機制御の役割は、2つに大別すると

- (1) 原子炉プラント状態把握
- (2) 原子炉プラント運転

に関するものである。(1)は原子炉プラント状態を的確に知ることが目的にしている。計算機からみて受動的な機能である。(2)は、計算機の出力をプラント運転に反映させるので能動的なものである。これらの項目と各々の内容を整理すると下表のようになる。



4. 1 運転記録

最もはやくから利用している計算機の機能である。

(1) 作表

運転に関する各種の記録・報告を作成する。

(2) 異常時データの記録

突発的な異常時信号を記録して、地上での検討解析に用いる。二つの方法がある。異常発生後すぐに関連の信号を選択して高速で計算機内に集録する方法と、あらかじめ決めた信号を常時一定の時間幅だけ記録して、異常発生直後の情報も残す方法である。

4. 2 運転状態監視

(1) 特性計算

性能計算とも呼ばれ直接検出できない、または検出されても確度の低い情報を他の信頼度の高い信号から推定する。炉心とプラントの計算に分れる。炉心の出力分布の計算は最も重要で、中性子モニターなどの信号と制御棒位置や炉外プロセス信号を組合せて繰り返し計算を行う方式が主に沸騰水型軽水炉で利用されている。この出力分布から安全限界内で高出力密度運転を可能にする限

界熱流束比を求め、燃料運用計画を決める照射量などの値を算出する。

(2) 異常検出

最も簡単なのは、定常運転時に検出信号や前述の特性計算結果を正常な値の許容範囲と比較する。原子炉の起動、停止、出力変更の場合には基準値も時間により変化する。対象は、信号の絶対値だけでなく中性子束、冷却材流量、温度などの統計的な揺らぎの性質も含む。また計算機システムの異常検出も問題であり、メモリーのパリティ検査やプログラムの進行に関する各種の点検手段で、ハードウェアとソフトウェアの異常を常時監視する。

(3) 異常診断

プラント安全性、稼働率を高めるのに、異常警報があった場合に関連個所の信号から原因を診断して処置を決る。

検出器の信号、特性計算結果の履歴から異常発生の予測をできれば、事故を未然に防止できるので都合がよい。

4. 3 運転制御

(1) 起動、停止後の点検、操作

原子炉プラントの起動時には、多数の弁の点検、計器や安全保護系の試験調整、補器類の起動などの煩雑な準備点検や操作を行う。これらの機能を計算機が行うようにする。

(2) 過渡運転制御

起動、停止、出力変更などの制御であり、シーケンス制御を行う範囲である。起動についてみれば、原子炉の臨界操作を行い所定の安全条件を満足させながら臨界に達するまで制御棒を徐々に引抜いていく。臨界後は、出力上昇操作を行う。許容の温度上昇率の範囲で昇温昇圧し、補器類や弁の操作をする。定格の圧力・温度に達すると、タービンの暖気を行った後に定格回転数まで増速し、発電機の調整を行った後10%程度の負荷で送電系統に併入する。

(3) 定常制御

定格出力を安定に保つのにいくつかのプラント状態量を一定にするように制御する。

(4) 安全保護操作(異常時処置)

検出した異常状態に対して原子炉プラントを安全にするための処置は、異常の内容によって異なる。このため、プラント側の異常診断を正確迅速に行いこの結果から原子炉の緊急停止、出力低減等の処置をとる。また計算機システム側の異常に対しては、計算機の切離し、バックアップ機の運転等のいくつかの防護処置をとる。

5. 自律分散システム

鉄道システム，鉄鋼プラントシステム，FA(Factory Automation)の分野ですでに実用化されている自律分散システムのデータ伝送の概念，利点そして自律分散システムを宇宙原子動力システムに用いる必要性和利用した場合の例，検証方法，効果について示す。

5. 1 データフィールドの概念

文献[3],[4]から自律分散システムで基本となるデータが流れる場であるデータフィールドの概念を示す(図6)。自律分散伝送システムにおける情報を、ラジオ、テレビ等のブロードキャスト的に伝送できる。ひとつの計算機が情報を送信しようとする場合には、情報となるデータ列全体に内容コードと呼ぶ一種の識別番号をつけて送信する。この内容コードは、ひとつのネットワークでは一連のユニークな番号とする。このため、このネットワーク上の計算機間であらかじめ意味のある情報ごとに内容コードを定義しておき、自分が必要とする情報を取込む時にこの内容コードを指定すれば取込めるようにするのが、この自律分散伝送システムの基本である。

具体的にはNCP(Network Control Processor)がこの処理をする。すなわち、ネットワーク上の計算機は、計算をはじめるときに、自分が必要とする内容コードをNCPに登録する。このため、NCPは該当する内容コードの情報が伝送されてくるとこの内容コードと情報を計算機に渡し、異なった内容コードの場合には単に通過させる処理を行う。

5. 2 利点

文献[3],[4]から自律分散システムを用いる場合の利点を示す。

(1) 耐故障性

ネットワーク上のどの部分に異常が発生しても残りの部分で伝送を続行できるので、従来システムに比べ耐故障性が向上する。このため、すべてのNCPは自律的に異常を検知し回復処理する機能を持つ。

(2) 実時間並行試験(オンラインパラランテスト)機能

試験機能を開発用計算機に登録すれば、実時間で通常の計算を行いながら容易に試験できる。

(3) ホロン概念の適用

光ネットワークのデータフィールドのなかには宇宙ステーションの管理計算機の出力も流すことができるので、各々の動力サブシステムのなかで管理計算機出力(全体情報)を把握しながら制御，点検・診断等の分化された機能を果たすことができる。

(4) 計算機資源の有効利用

計算機資源に余裕がない時に従来システムでは、計算機にメモリーを増設するなどした。自律分散システムでは、その時点で余裕のある計算機に機能モジュールを移せばよい。

(5) 故障解析の容易性

システム全体のインタフェースがすべて内容コード方式であるので、すべての情報を開発用計算機で収集でき、故障解析を容易にできる。

(6) 拡張性の評価

図6に示すように同一ネットワーク上にサテライト計算機を設備の拡張に従って順次接続していくことが容易にできる。従来のシステムでは計算機間に、グローバルメモリーやマルチアクセスコントローラ等の機器が接続されているだけ拡張作業を困難にしている。

(7) 開発効率

ソフトウェア開発での自律分散システムでの特長は従来の集中方式と違い、機能モジュール単位に入力データ、出力データが明確に定義されており、自己完結的に設計を進めることができる。一般に、開発するプログラムが大きくなるにつれ、製作の時間と複雑性は急激に大きくなる。従来からその対策としてプログラムを幾つかの小さなプログラムに分けて(モジュール化)、その複雑さを減少させる工夫をしているが、これらのモジュールがより独立的になるほど生産効率は向上する。

機能モジュールのようなデータフローの場合はサブルーチンコールによるモジュール分割よりも独立性が高い。従って生産性もより向上する。

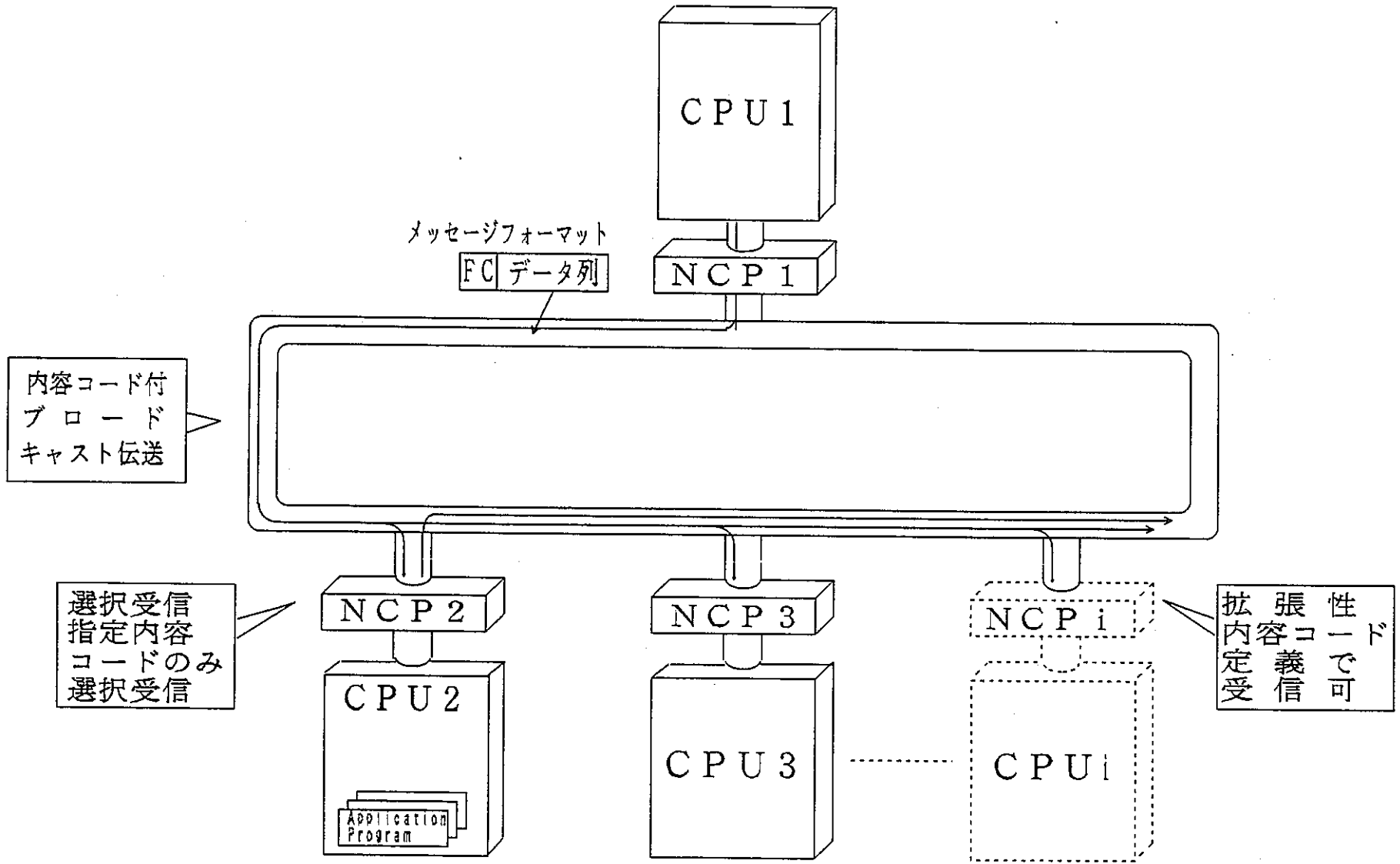


図6 自律分散システム

6. 自律分散宇宙原子動力システム

6. 1 必要性

自律の必要性は文献[1]のなかに示されているので、ここでは分散制御の必要性を文献[6]から示す。ローカルAI制御部に分散協調制御を用いることを示している。原子力プラントのような複雑で大規模なシステムでは、完全な中央集権的制御方式を採用すると次のような問題が生じる。

- ① 万一中枢制御部が故障を引き起こすとシステム全体が停止する。
- ② 中枢制御部で果すべき機能があまりにも複雑かつ大規模になるため計算速度、記憶容量、ソフトウェアの信頼性等の観点から要求を満足させるシステムを実現するのが困難である。

このため、他のシステムと情報交換の少ない系統・機器をひとまとめのシステムとみなしそれらの独立性を強め、かなりの部分は単独に制御可能とする。ただし、完全には独立でなく、中枢制御部(ここでは総合判断部)と情報交換を行いプラント全体と協調をとる分散協調制御方式を採用する。

また、文献[7]のなかにエネルギー分野において“集中”から“分散”への必然性も示されている。この文献のなかのホロンの概念は文献[8]のなかのアーサー・ケストラーの考え方(付録1)が参考になっている。

6. 2 適用例

自律分散宇宙動力システムの例を図7に示す。地上ステーションと交信する宇宙ステーションのなかの2台の管理用計算機と1台の開発/バックアップ用計算機が光ネットワークとネットワーク制御プロセッサを通して合計9つのサブシステムに分散した動力制御サブシステムに接続される。ハードウェア、動力システム計算機そして地上の役割分担を表3に示す。

6. 2. 1 管理用計算機

宇宙ステーションに、地上ステーションと動力システム側の計算機との情報交換を統括的に行う管理用計算機をおく。信頼性を高めるのに2台の計算機を同じプログラムで並行して動かす、どちらかの計算機に故障が発生しても動力システムの運転に支障を生じないようにする。この計算機で、運転記録としての定時データログ、任意時ログ日報、週報、月報等の作表と異常時のデータ収集を行う。また運転状態の監視として、炉心とプラントの特性計算を行う。設備側との直接のインタフェースは、NCPで行う。

6. 2. 2 開発/バックアップ用計算機

宇宙ステーションに開発、バックアップ用の計算機をおく。ここで動力制御サブシステムのすべてあるいは一部のアプリケーションプログラムを動かせる。このとき、オンラインで制御に使用している動力システム側の計算機と同じ入力メッセージが前述のデータフィールドの条件を満たしながらネットワークのなかを流れているので、この開発計算機でも動力システム側の計算機と同じ状態で試験プログラム

を動かすことができる。このように、あらかじめソフトウェアの増設、改造を行う場合、実際のプロセスデータを使用して試験ができるためによりソフトウェアのトラブルを大幅に減少させることができる。

6. 2. 3 動力制御システム計算機

動力制御システムの中の計算機は、2つに大別すると制御と点検・監視を行うのでこれらについて分けて示す。原子動力システムのなかのサブシステムのなかの信号と計算機との関係等を図8に示す。データは増幅器、フィルター等のシグナルコンディショナーを通してA/D変換器ですべてデジタル信号にする。

(1) 制御

起動、停止、出力変更の過渡運転と定常運転、安全保護操作の制御には高度の制御演算を行う直接制御DDC(Direct Digital Control)を用いる。信号入出力装置を通して入力したプラント状態量を演算し、この結果で操作機器を直接操作する。

AECL(Atomic Energy of Canada Ltd.)は原子力分野におけるDDCのパイオニアであり、1966年にDouglas Pointの反応度制御に利用した(文献[9])のが最初である。最近では緊急冷却系、炉停止系の安全系にも計算機を利用している(文献[10])。日本でもTMI事故(1979年)の後の1980年から1984年までの間に通産省の第1期補助事業として開発されたCOSS(Computerized Operator Support System)のなかでDDCを用いた。そして、1984年から1991年の間の第2期の開発(文献[11])のなかでは安全保護まで含めてDDCを利用しようとしている。

また、時間遅れが大きい系フィードバック制御が困難な場合には知識ベース制御を考える(文献[12])。システムの同定が難しい非線形系では、制御理論的モデルに基づくフィードフォワード制御が困難である。このため、時間遅れが大きくかつ非線形な系に対して、知識ベース制御を考える。また離散的で、大規模かつ複雑な事象駆動型システムの制御問題においても、組合せ的な問題が生起するために、知識ベース制御が有効と考えられる。

制御系における知識獲得は、状態空間を適当な数に分割し、分割された各副状態空間に対し適正と思われる制御則を抽出することである。状態空間の分割数を増やせばそれだけきめ細かい制御が可能になるが、知識の獲得のための時間を多く必要とする。この場合、ファジィ制御が有用である。ファジィ制御では、状態空間のいくつかの代表点に対し、人間の専門家から制御則を求め、状態空間の任意の点について、ファジィ理論によって近傍の制御則を組合せて統合化することにより、制御則を導出する。この方法では知識獲得の問題は大幅に緩和される。だが、代表点の選択方法は困難な問題であり、また情報量的に適切な代表点の数を設定する必要があり、試行錯誤的に行うことになる。

システムの状態の過去の履歴に著しく依存し、適切な制御則を決定するうえで多段階の推論を必要とする場合には、ファジィ制御は困難になり、通常のルールベース制御に頼らざるを得ない。この場合、知識獲得に大きな負荷がかか

る。ただしシステム自体もともと自律性が高く、大局的な制御さえ施せば、あとは自動的に最適な状態に復帰する可能性が高い場合には、知識獲得の問題はある程度緩和される。

対象が離散系の場合、従来はシーケンス制御の問題とされてきたが、ルールベース制御は可能性が高く、保守が容易なことから、知識獲得の上からも有利である。ただしシステム制御の完全性を検証するための支援環境を必要とする。

制御システムは一般に厳しい実時間性を要求するために、獲得した知識をそのままの型式を保持するのではなく、コンパイルしたり、再組織化することにより、推論の高速化を達成することが必要である。

しかし事前にシステムが取り得るあらゆる状況を列挙しつくすことは不可能である。これは枠問題と呼ばれる。事前に想定した枠からシステムの状態が逸脱した場合の対処法も講じておくことが必要である。

(2) 点検・診断

点検プロセッサでは、動力システムの起動前に多数の弁の点検、計器や安全保護系の試験調整、補器類の起動などの煩雑な準備点検や操作を行う。この場合にも、知識ベース制御を考える。監視プロセッサでは、原子炉の起動、停止、出力変更の場合に基準値を時間によって変化させながら異常を検出し、異常の原因を同定するための診断を行う。異常の診断には知識ベースと推論部が分れ推論部と独立して知識ベースの保守を容易に行える人工知能技術を利用する。

システムの仕組みに基づく診断については、高度な知識ベースが必要となる(文献[13])。つまり、IF-THEN型の知識と単一の推論の筋道(single line of reasoning)に基づくAND/OR木型プロダクション・システムでは不十分であり、フレーム・モデル等を用いた、対象モデルのような深い知識を操作するタイプ(文献[14])のものが要求される。つまり、専門家により近い構造をもったエキスパート・システムが必要となる。現在はAND/OR木型が一般的であるが、将来はこの種のものが増加するであろう。

また、アメリカにおける1979年のTMI事故後に加速された原子炉異常診断技術の開発をみればCCT(Cause Consequence Tree), モデル比較法(文献[15]), ニューラルネットワーク(文献[16])等の技術を利用することも考える。

6. 3 自律型プラントの“規範”との関連

文献[6]のなかに自律型プラントの規範について示されているので、ここではこれらの規範と前節6.2適用例に示した自律分散宇宙原子動力システムとの関係を考えてみる。

文献[6]のなかの規範を見てみる。まず基本的な規範は自分の基本機能を維持するためのものである。システムをブラックボックスと考えた時、その入出力の関係を正常に保持することである。これは自律的であるための最低必要条件である。次の規範は環境が自系に影響するときそれを回避することである。外界の変化による影響に対して自系の健全性を守る必要がある。

また逆にそのシステムから環境に対し影響を与えないことである。公害を発生させ

ないなど一般工業プラントでも当然であるが、原子力プラントの場合は特に必要性が高いのは言うまでもない。また、自系の故障や外乱時に援助を要請するシステムの場合は最適な意志表示機能がなくてはならない。修理する人間系と最適な協調をし被害を最低限にする能力が必要である。

以上より進んだ規範として自己改良機能がある。最適化するように自己変革し学習していく。自系の改良箇所を自ら発見し自らを変化するのは、かなり理性的論理的である。また判断の基盤となる知識を自らの手で増やすシステムである。最後には自己組織化であり、自己の機能不全（けが、病気、故障）に対し自らの機能・能力のみで修復することである。生物では自らの持つ回復力で怪我を治す能力を持つが、機械系においても自律化が進めば到達すべき規範である。自律化した機械系が自己組織化まで進化すると無人化プラントとも言えるが、自系内で完結し人的判断や作業が不要なプラントであっても完全なブラックボックス化することは有り得ず、その状態を外界に伝達できる能力が必要である。原子力プラントの管理者がプラント状態を十分に把握すべきなのは当然で、適切な表示・対話装置など情報交換能力を必要とする。

自律分散宇宙原子動力システムは、文献[6]のなかの(1)基本機能の維持(2)意思表示機能等の基本的な規範をほぼ満たしている。宇宙原子動力システムのなかのサブシステムの機能が喪失しても、これらの故障をNCPが検知し、この故障サブシステムを切離し、このサブシステムの機能を他のサブシステムのAIP(人工知能プロセッサ)あるいは開発/バックアップ用計算機で代替させるからである。意思表示機能はNCPが故障を検知することと等価である。環境との関係についても安全系(安全棒等)の具備、確率論的安全評価等により環境と共存できる宇宙原子動力システムの構築が十分に可能である。

進んだ規範としての自己改良機能は極めて難しい課題であり今後の技術の進歩に合わせて考えていく必要がある。自己組織化については光ネットワークの冗長化等により、宇宙ステーションとの十分な情報伝達能力を持たせれると考える。

6. 4 検証方法

- (1) デジタルハードウェアを含む宇宙ステーションと動力システムの点検・監視、制御機能のすべてを検証する
- (2) 宇宙飛行状態を得るのに、シャトルで同じもので検証する
- (3) 信頼性があることをあらかじめ示すのに、実際の宇宙ステーションで監視機能だけを最初に検証する
- (4) 地上からも制御できるようにして、実際の宇宙ステーションで点検・監視、制御機能を検証する

6. 5 基本的基準との比較

自律分散宇宙原子動力システムを構築すれば、文献[1]のなかの動力制御サブシステムのハードウェアとソフトウェアの次の基本的な基準を満足すると考える。

- (1) システム制御器は、耐故障性を持っている
- (2) ハードウェアの冗長性と制御器の再配置は、特に検知、データ収集、信号処理

- のなかでできる必要がある
- (3) 計算機は、ひとつの自律期間の保存用データを、後で地上の送るのに記録する必要がある
 - (4) 計算機は、宇宙ステーションでの健全状態を監視し、自己試験して電気負荷の制御をする必要がある
 - (5) ソフトウェアは、地上から変更、保守できる
 - (6) 宇宙船からの指令とデータ処理サブシステムとの間のインタフェースは、簡単で信頼性が高い

表3 ハードウェア、動力システム計算機、地上の役割分担

機 能	ハードウェア	動力システム計算機	地 上
故障検出／修正			
高々速	×		
高速		×	
低々速		×	
ルーチン制御			
高々速	×		
高速		×	
低々速			
性能監視			
高速		×	
低々速		×	
ミッション制御／操作 (負荷管理)			
高速		×	
低々速			×

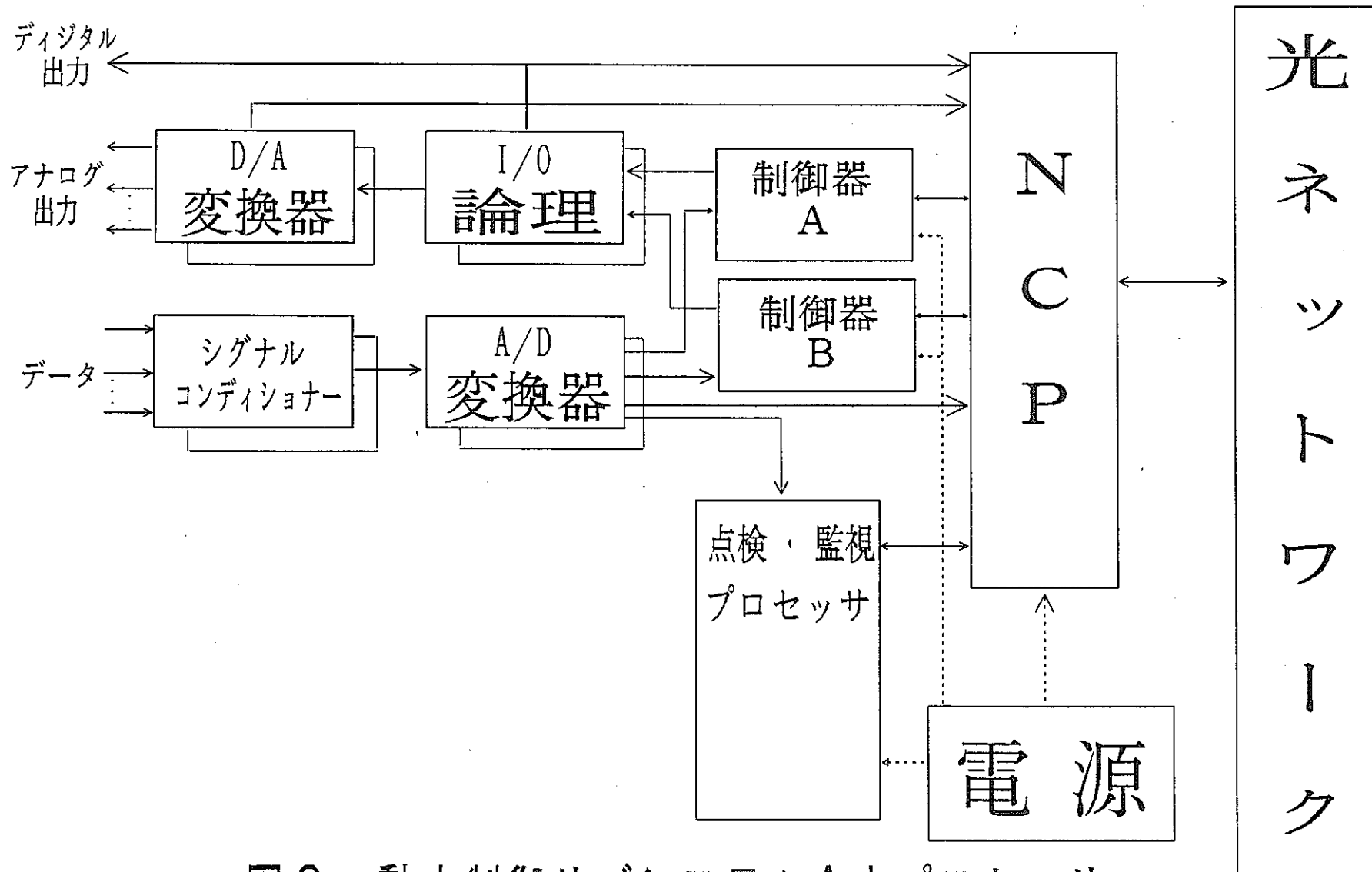


図8 動力制御サブシステムA | プロセッサ

7. 今後の課題

7. 1 自律分散システム構築の条件

宇宙原子動力システムに文献[3],[4]から調べた自律分散システムの概念を適用する時の条件を整理する。このために、自律分散システムの開発を行った(株)日立製作所システム開発研究所、このシステムを構築、運用している川崎製鉄千葉製鉄所を訪問し、意見交換を行いたいと考える。

文献[17]によれば分散型の計算機システムの一般的研究課題として

- (1) LAN
- (2) 分散OS (Operating System)
- (3) 分散データベース
- (4) 協調・分散プログラミング言語
- (5) 並列アルゴリズム理論
- (6) 並列構造・相互関係
- (7) 耐故障性・超信頼システム
- (8) 分散実時間システム
- (9) AIの協調問題解法 (cooperative problem solving technique)
- (10)分散デバッキング
- (11)分散シミュレーション

等を示している。また、

- ・オブジェクトモデル
- ・アクセス(Access)制御
- ・分散制御
- ・信頼性
- ・異方性(heterogeneity)
- ・効率

を分散システムの形態、用途等に依存しない基本的課題としている。オブジェクトモデルはデータを抽象化したものである。分散計算機システムのハードウェア、ソフトウェアのすべての資源をオブジェクトと考える。各々のオブジェクトの交信をSEND/WAIT, SEND NOWAITのような伝達プリミティブ(communication primitive)で行う。

オブジェクトモデル化されたハードウェア、ソフトウェアに近づくのにアクセス制御が必要である。分散制御は分解技術(decomposition technique)とも呼ばれ、大きな問題をどのように分割するかを扱う。異方性は分散システム間の異なるOS, ファイルサーバ, データベース, 通信プロトコル等から生じる問題である。

7. 2 自律分散システムの効果の示し方

自律分散システムの利点を示す解析を行う。現在の考えを示す。

(1) 機能代替性能

開発/バックアップ用計算機によるパラメータ推定と機能モジュールのモデル

を利用して故障した機能モジュールの代替性を機能代替時間をパラメータに示す。このためには、まず最初に宇宙動力システムのシミュレーションコードをSSC, COPD等のFBR動特性コードを改良して作成することが必要である。

(2) 機能モジュールコーディネーションの簡略性

動力システムの状態に応じて機能モジュールの性能を変える時に、自律分散システムは光ネットを通して管理用計算機からのデータで状況の変化を知り、自身のなかの制御あるいは点検・診断論理を変えればよい。しかし、集中システムは統括(管理)計算機で状況の変化を知り、この変化の対応方法を考え、必要な対応を下位の計算機に指令する必要がある。動力システムの変化が複雑になるとこのコーディネーションが極めて難しくなると考える。

これらのコーディネーションの比較を2～3の事故例をもとに分析的に示す。

8. 結言

鉄道システム、鉄鋼プラントシステム等の分野で実用化されている自律分散システムの概念を利用して、自律分散宇宙動力システムを構築する方法を検討した。地上ステーションと交信する2台の管理計算機と1台の開発用／バックアップ用の計算機を宇宙ステーションに置き、これらの計算機と動力システムのなかで原子炉、一次・二次熱輸送系、補助動力源、動力調整・分配系、打ち上げ船切離し、宇宙ステーション／動力システムの配置を制御する分散した合計9個のAIプロセッサを光ネットワークでネットワーク制御器を介して接続する。

ネットワーク制御器は異常を検知しこの部分のAIプロセッサを切離す等の機能をもつので、ネットワーク上のどの部分に異常が発生しても残りの部分でデータ等の伝送を続行できるので耐故障性が向上する。光ネットのなかには各AIプロセッサの入出力・制御信号等が流れるので、故障したプロセッサの機能を他のプロセッサあるいは開発／バックアップ用の計算機で代替できる。またオンラインパラランテスト、故障解析、開発効率の向上、計算資源の有効利用を期待できる。

しかし、データの抽象化の方法、数多くのハードウェア、ソフトウェア等の計算資源を利用するためのアクセス制御、異なるOS(Operating System)、データベース、通信プロトコルを用いることから生じる異方性等の分散型計算機システムを構築する場合の一般的研究・開発課題もある。

このため、今後自律分散システムの設計者、利用者を訪問し、自律分散宇宙動力システムを実現するための詳細な研究・開発課題を摘出していくことが必要である。

参考文献

- [1] M.S.Imamura and J.H.Masson "Autonomous Control Design Considerations for Space Nuclear Power Systems" Space Nuclear Systems 1984
- [2] 岩田 勉 "月面ロボット" 計測と制御 Vol.28, No.12, p44, 1989
- [3] 森 欣司 "自律分散システム" 電子通信学会誌 Vol.69, No.3, 1986
- [4] 中井耕三, 森 欣司 "自律分散システム技術の制御分野への適用の現状" J.IEE Japan, Vol.109, No.11, 1989
- [5] 石森富太郎 編 "原子炉工学講座6 = 計装制御" 培風館, 1972
- [6] 三木哲志, 玉山清志 "自律型プラントの開発(5)自律型原子力プラントの概念検討" PNC N9410 89-070, 1989
- [7] 石井威望 "ホロニック・パス" 講談社, 1985
- [8] ㈱三菱総合研究所 "ホロンと自律型プラントとの技術関係ネットの作成に関する報告書", 1985
- [9] G.A.Hepburn "DIRECT DIGITAL CONTROL IN CANDU NUCLEAR POWER PLANTS-MAXIMUM UTILIZATION OF A DUAL REDUNDANT MINI-COMPUTER SYSTEM" AECL (ref-FG95)
- [10] N.M.Ichiyen "DIGITAL COMPUTERS IN CANDU SAFETY SYSTEMS— PART1: HISTORY AND CONCEPTS" AECL, Sheridan Park Research Community, Mississauga, Ontario, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.NS-20, No.3(1983)
- [11] Kanji Kato, Takao Watanabe and Hiroyasu Hayakawa, et al. "MITI Project on Advanced Man-Machine System for Nuclear Power Plants: Its objectives, Functions, and Present Developmental Status" International Seminar on Human Interface, Kyoto, 1988
- [12] 小林重信 "知識工学" 昭晃堂, 1986
- [13] 上野晴樹 "知識工学入門" オーム社, 1985
- [14] 玉山清志 "自律型プラントの開発(10)—— 深い知識を利用した推論システムの開発(その1)"
- [15] Eyvind Ness, Øivind Berg, Aimar Sørensen "Early Detection and Diagnosis of Plant Anomalies Using Parallel Simulation and Knowledge Engineering Techniques" Proc. of IAEA Specialists' Meeting on AI in Nuclear Power Plants, Helsinki, 1989
- [16] Kenshiu Watanabe, Kiyoshi Tamayama "DIAGNOSIS METHOD UTILIZING NEURAL NETWORKS" Proc. of IAEA Specialists' Meeting on AI in Nuclear Power Plants, Helsinki, 1989
- [17] JOHN A.STANKOVIC "A Perspective on Distributed Computer Systems" IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS, VOL.C-33, NO.12, December 1984

付録1 宇宙原子炉の制御方式

INTERACTION OF THE CONTROL SYSTEM WITH
CORE NUCLEAR DESIGN FOR FAST SPECTRUM SPACE POWER REACTORS

R. M. Lell and N. A. Hanan

出典：FOURTH SYMPOSIUM ON SPACE NUCLEAR POWER SYSTEMS
TRANSACTIONS, INSTITUTE FOR SPACE NUCLEAR POWER STUDIES,
January 12-16, 1987

〔序〕

原子炉の信頼性と安全性を評価するのに、原子炉制御システムとその運用方法が重要である。制御システムとその作動モードは、炉心の機械設計と原子炉設計全体に影響を及ぼす。このことは、宇宙炉において顕著である。大きさを小さく、軽く、余分な操作・保守なしに長期間高い信頼性で動かす要求を課せられるからである。

本論文は、高速スペクトル宇宙炉の核設計と原子炉制御システム設計の問題の一般的な特徴を概説する。解析する原子炉は、一般的なピン形状、陶性合金(cermet)のUN燃料の小さな高速スペクトル炉である。冷却材はリチウムである。炉心の被覆材、構造材はタングステン・レニウム合金である。炉心半径は15~30cmである。しかし、ここでの結論は、小型の高速炉に一般的である。

いくつかの基本的な制御概念を検討した。炉外制御ドラム、炉内制御棒、炉心中の可燃焼毒、溶解(dispersed)毒、そして可動燃料体(segments or regions)である。MC²-2から、断面積を計算した。核計算に、VIMモンテカルロコード、ONEDANT, DIF3Dを用いた。

〔解析〕

炉心外制御ドラム方式は、宇宙炉で一般的である。制御ドラムは、炉心を貫通しない、シールの必要性がなく構造的に簡単であることの利点がある。ドラムは、3つの特徴をもっている。

1点目は、外部の制御ドラムに負う最大ワース(worth)が炉心の半径に強く依存する点である。表1に、3つの代表的な炉心構成で計算したドラムのワースを示す。ドラムのワースは炉心の半径が増大するに従って減少する。炉心の中央部が、ドラムにほとんど影響されないからである。ドラム制御システムは、小さな半径の炉心でうまく作動する。

Table 1. Drum Worth as a Function of Core Radius.

Case	Radius, (cm)	Drum Worth (Δk)
1	17	0.1017
2	24	0.0788
3	31	0.0562

2点目は、ドラムでは合計のワースが制限されていることである。形状が、ドラムの数と場所を制限している。毒物を増やしたり、毒物の厚みを増やすことがドラムのワースを増やす唯一の方法である。しかし、これらの方法はすぐに現実の問題を生じる。

3点目は、制御ドラムの動きが炉心の半径方向の出力分布を移動させる点である。表2に、炉心の半径方向の出力分布のドラム位置依存性を示す。零度で、毒物の部分が炉心に最も近い容器のすぐ隣であることに対応する。180度で、毒物の部分は炉心から最も遠い外側である。このような出力の移動は、極めて好ましくない。機械設計を複雑にし、炉心の核性能を低下させるからである。

Table 2. Normalized Radial Power by Hexagonal Fuel Ring as a Function of Drum Poison Position.

Fuel Ring	Normalized Average Power	
	0° Rotation	180° Rotation
1 (Center)	1.0	1.0
2	0.932	0.978
3 (Outermost)	0.707	0.945

制御ドラムの代替（あるいは補追）に一般的に用いられる炉内制御棒は、ドラムに比べて3つの利点とひとつの短点をもつ。利点の最初は、制御棒のワースがドラムに比べて同一の炉心構成で大きい(2倍)。ドラムのワースで最新の長寿命炉心設計の制御を十分にできるので、この差は大きい。2点目は、制御棒のワースを炉心の大きさに比較的依存しないようにできる。3点目は、制御棒を炉心を通しておおよそ均一に配置できるので、半径方向の出力分布は制御棒の動きにわずかに影響されるだけである。制御棒の動きは軸方向の出力シフトを引き起こす。

制御棒の最大の欠点は、機械設計を複雑にする炉心部の貫通、高い信頼度のシールとさらに物理的な空間が要求される点である。

理想的な制御システムは、特定の場所でなく炉心部に均質に影響するのであろう。この均質性を実現するのは、炉心部に分散させた毒物である。小型の高速スペクトルの宇宙炉の高燃焼反応度の振動(swing)を補償する受動的な可燃焼毒は、制御システムの設計を簡素にする。数多くの可燃焼毒の材料をここで考えたが、目的にかなうものはひとつもなかった。ここで考えている原子炉の炉心のスペクトルが極めて固いので、従来の毒物材料がU235の燃焼度にあった必要な吸収特性を持つことができないか

らである。大きい体積比の毒物が、これらの炉において燃料度の進行に伴う振動を補償するのに必要である。従来の可燃毒を用いれば、動的な運転操作をすることなしに燃料の燃焼度の進行を補償する受動的制御が可能になる。

時間とともに動的変化させた溶解毒物の場合にも、同様の結果を得ることができる。ここでの冷却材はリチウムである。冷却材中のリチウム 7^{**} に対するリチウム 6^* の量を変えると炉心部の中性子捕獲割合を変えられる。リチウム 6 の割合を変えて、燃料燃焼度の進行に伴う振動を補正することも可能である。さらに、リチウム 6 の量を変えても炉心の出力分布は変わらない。最大の欠点は、リチウム 6 の量を変える装置の機械設計とリチウム 6 の量が多くなった場合の大きな冷却材ボイドワースの可能性である。

この概念は、ヘリウム-3で以前に検討された。B₄Cとリチウム 6 を用いた計算がこの概念が中性子的に可能であることを示した。このシステムを必要なだけの変化を確実にしながら能動的に制御する。

[まとめ]

宇宙用高速炉心の核設計は、制御システムの設計に強く依存する。宇宙炉の一次制御装置に最も一般的に提案されている炉外ドラムと炉心のなかの制御棒は、炉心設計を多様にするとともに相反する問題を生じる。ドラム制御は、小さな半径で高い背の炉心にする。制御棒システムは、どちらかという背が低く大きな半径の炉心にするが、あまり炉心の形状に影響しない。(制御ドラムに比べて)大きなワースの制御棒システムは、最近の長寿命炉心の設計に都合がよい。ドラム、制御棒が動くと、各々半径、軸方向の出力分布が移動する。最後に、これらの2つのシステム間で機械設計の複雑さがかなり変る。

溶解毒物を一次制御システムに用いることはできないが、燃焼度の進行(swing)、他の反応度変化を補償して、一次制御システムの設計要求を低いものにすることができる。溶解毒物システムはドラム、制御棒のワースをわずかにしか減じないが、一次制御システムの運転を容易にする。特に、好ましくない出力分布の移動を起こさない。

これらの利点を打ち消すように、ある環境で溶解毒物の考え方が反応度について好ましくない出力係数を示すかもしれない。信号なしの制御概念、システムは、問題を生じない。現在までの検討のなかで、いくつかの選択の間における利点とトレードオフを明らかにした。

* (訳者注1) リチウム $6(^6\text{Li})$ は天然に7.42%存在。945barnの中性子吸収断面積を有し、 (n, α) 反応によりHeのガスを生じる。

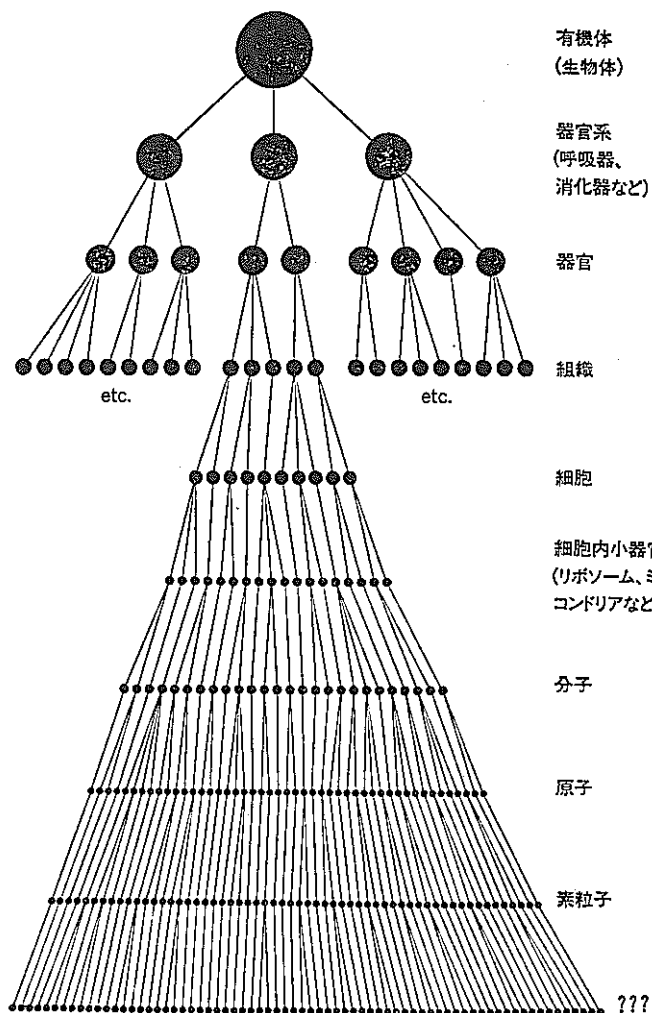
** (訳者注2) リチウム $7(^7\text{Li})$ は天然1292.58%存在。中子と反応しない。

付録2 ホロンの概念

1. 哲学概念としてのホロン

ホロンという用語が最初に現れたのは、「機械の中の幽霊」[ケストラー (Arthur Koestler)] であると思われる。holonという言葉は、全体を意味するhol-(ギリシア語のholos)と、部分分子を意味する-on(proton, photonなど)を結びつけたものである。ケストラーのホロンという考え方を理解するには、まず階層(hierarchy)という構造を認識することから始まる。すなわち自然も社会もすべてこの階層というものが密接にあるいは本質的に入り込んでいるということを知ることが出発点となる。

ケストラーの理論の着眼点はこの階層構造の中にある各要素の性質である。ホロンとは、holonという語の成り立ちが意味するように、階層の中にあるノード(節)



付図 生体の階層構造 付図 生体の階層構造 ((ケストラー 78) による)

を指し、その節点が階層の上位に対しては部分として、下位に対しては全体として働くという二面性を合わせもつことを意味する。従ってホロンそのものは抽象的な概念であるが、階層的構造を持つものの中に存在するあらゆるものはこの二面性を持つホロンであるとみることができる。

ホロンという言葉初めて前面に出してその概念を紹介したケストラの著作に、「ホロン革命(1978)」がある。この本の原題は(Janus)ヤヌスという。ヤヌスとはローマ神話に出てくるふたつの顔を持つ神である。ケストラがこの題名に意図したのは、ホロンという概念が、階層の上を見たときと下を見たときという異なる二つの顔を持つことによる。

2. ケストラの学問的背景

ケストラの考え方の背景には、彼自身の学問的バックグラウンドの特殊さも相俟って、既存の学問に対する反発のしかたに多様な視点があることが認められている。彼自身の経歴をまとめると、まず彼はハンガリーのブダペストに生れ、ウィーンの大学で物理学を専攻する。のちシオニズム(ユダヤ人のパレスチナ帰化運動)、あるいは共産主義といった政治イデオロギーにからむ思想を研究する。のち科学ジャーナリストとして、物理学・生物学・心理学に精通した話題を提供し続け、自己の思想形成を行ってきた。その多方面からの視点は後に反還元主義という主張に集積し、それが階層の中の各要素の二面性、すなわちホロンという考え方に到達することになる。このホロンという考え方に基づいた科学哲学により、彼は近世以降世界で指示されているダーウィン主義による進化論、あるいは行動主義といった考え方に強い反発を示している。

3. 反還元主義

ホロンの概念を持ち出す思想背景には、還元主義(reductionism)に対する反発がある。還元主義とは、ある構造体の示す性質とはその構成要素個々の持つ性質に還元できる。逆に言えば、全体の示す性質というのは個々の構成要素のもつ性質の集積であるという考え方である。還元主義の背景には、近世以降において、その科学の発達過程が、すべてのものを要素に分解して考え、そこにある共通な一般法則を見いだすというやり方で大きな成功をおさめたということがある。しかしながらこの還元主義がその後の科学の発達を停滞させた要因であるとし、これに反発することで、新たな科学の進展をめざそうという動きも新しい科学哲学として興ってきていた。ケストラはこの反還元主義を唱える人達を集め、オーストラリア、アルプバッハにおいてシンポジウムを開いた。このときの講演集が「還元主義を越えて」である。還元主義に相反する概念として打ち出されたのが、ホーリズム(holizm)である。ホーリズムの中心的主張は、全体というのが部分の和以上であること、すなわちある実体を把握するのに構成要素に分解してその性質を調べるだけでは不十分であるということである。数年前ピューリッサー賞を獲得したD. R. Hofstadterの名著、Goedel, Escher, Bachの中にもこのholizmとreductionizmの対立が色々な例で述べられている。

4. ダーウィン主義への反発

ケストラーがその著書の中で述べている内容には生物学に対する深い造詣があるが、その主張が純粋生物学的視点にとどまらず、ダーウィン主義という哲学に対する反発も含んでいることも大きな特徴である。ダーウィン主義を要約すれば、「生物の進化はランダムな突然変異が自然淘汰された結果である」と言うことになる。ケストラーは眼というかくも複雑な器官が偶然にできたとするダーウィン派の考え方に強く反発し、細胞共同による組織の形成という自説を主張する後ろだてのひとつにしている。

5. 行動主義に対する疑念

今世紀心理学の重要な支柱に行動生物学があるが、ケストラーはこの行動主義にも強い反発を示している。行動主義とは、心理を探求するのに被験者の内省を完全に除外することを旨とする。すなわち実験データの客観性を得るために、心とか意識、想像といったものを取除いて、外から見える観察のみによってその内部状態を推察しようという考え方である。これは特に動物の知能や心理を研究する目的でその挙動を観察する行動生物学という形に発展した。ケストラーはこの外部からの定量測定のみが科学の名に値するという哲学を非難し、したがって複雑な事象もそれを構成する要素の事象に分解されれば説明されるはずであるという思想(還元主義)を忌み嫌うことになる。

ケストラーの主張の中にある、従来の科学の手法に対する批判にはこれまで物理的・解析的な手段で説明がつかないようなことはすべて非科学的と決めつけてきたことに対する反省がある。ケストラーにおいては、新しい科学の地平は超常現象と呼ばれるものも同時に説明されなければならないとされる。特に、「心」の科学、あるいは精神の発達史というべきものに強い関心が見受けられる。

ケストラーのこの一連の主張は、単に哲学談義にとどまらず、工学・実社会にもさまざまな応用議論を呼び起こしている。