



制御系設計標準

平成 25 年 3 月 29 日 A 改定
(平成 22 年 3 月 2 日 制定)

宇宙航空研究開発機構

免責条項

ここに含まれる情報は、一般的な情報提供のみを目的としています。JAXA は、かかる情報の正確性、有用性又は適時性を含め、明示又は黙示に何ら保証するものではありません。また、JAXA は、かかる情報の利用に関連する損害について、何ら責任を負いません。

Disclaimer

The information contained herein is for general informational purposes only. JAXA makes no warranty, express or implied, including as to the accuracy, usefulness or timeliness of any information herein. JAXA will not be liable for any losses relating to the use of the information.

発行

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

宇宙航空研究開発機構 安全・信頼性推進部

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

目 次

1.	総則.....	1
1.1	目的.....	1
1.2	範囲.....	1
1.3	関連文書.....	2
1.3.1	文書体系.....	2
1.3.2	適用文書.....	2
1.3.3	参考文書.....	2
1.4	用語・略号.....	3
1.4.1	用語.....	3
1.4.2	略号.....	6
1.5	単位.....	8
2.	制御系の設計の進め方.....	9
2.1	全般.....	9
2.1.1	制御系の構成.....	9
2.1.2	制御系設計作業(設計技術の概要).....	12
2.2	制御エンジニアリングプロセスの定義.....	12
2.3	プロジェクトの各フェーズにおける制御エンジニアリング業務.....	17
3.	制御系設計プロセスに対する要求事項.....	22
3.1	制御エンジニアリング管理(インテグレーション及び管理).....	22
3.1.1	全般.....	24
3.1.2	制御エンジニアリング計画管理(活動の組織及び計画).....	24
3.1.3	技術データ管理(システムズエンジニアリングデータベースへのデータ提供).....	24
3.1.4	他分野とのインタフェース管理(機械技術、ソフトウェア技術等).....	24
3.1.5	制御器の一部としてのマンマシンインタフェース管理.....	24
3.1.6	配分及びマージン管理の方針設定.....	24
3.1.7	制御技術とコスト効率のアセスメント(事前評価).....	25
3.1.8	リスク管理.....	25
3.1.9	制御系コンポーネント調達の技術支援.....	25
3.1.10	コンフィギュレーション管理(飛行中の保守を含む制御に関する変更管理).....	25
3.1.11	制御エンジニアリングに関する能力及び資源に関するアセスメント(事前評価).....	25
3.1.12	安全管理.....	25
3.1.13	信頼性管理.....	25
3.1.14	品質保証.....	25
3.2	要求分析及び要求事項の管理.....	26

3.2.1	全 般	26
3.2.2	要求分析	26
3.2.3	制御要求の作成	27
3.3	制御系設計	28
3.3.1	全 般	28
3.3.2	システム設計	28
3.3.2.1	全 般	28
3.3.2.2	方式設計	28
3.3.2.3	制御アルゴリズム設計	29
3.3.2.4	運用モード設計	29
3.3.2.5	機能設計	29
3.3.2.6	構成設計	29
3.3.2.7	コンポーネント設計	29
3.3.2.8	インタフェース設計	30
3.3.2.9	地上検証試験対応設計	30
3.3.2.10	設計過誤の防止	30
3.3.3	要素設計 制御器の設計	30
3.3.3.1	全 般	30
3.3.4	要素設計 コンポーネント設計	30
3.3.4.1	センサ	30
3.3.4.2	アクチュエータ	30
3.3.4.3	搭載ソフトウェア	31
3.3.5	実装運用設計	31
3.3.5.1	全 般	31
3.3.5.2	制御系の運用システムへの実装方法	31
3.4	解析	32
3.4.1	全 般	32
3.4.2	解析モデル、解析手法及び解析ツール	32
3.4.2.1	全 般	32
3.4.2.2	解析モデルの定義	33
3.4.2.3	解析手法及び解析ツール	34
3.4.3	要求分析のための解析	34
3.4.3.1	全 般	34
3.4.3.2	ミッション解析・システム解析及び制御エンジニアリング要求分析支援	34
3.4.3.3	外乱及び擾乱解析	35
3.4.4	制御系性能解析	35
3.4.4.1	全 般	35
3.4.4.2	誤差解析	35

3.4.4.3	安定解析・ロバスト性解析	35
3.4.5	検証解析	35
3.5	製作・試験	36
3.6	検証および妥当性確認	36
3.6.1	全般	36
3.6.2	制御検証計画の策定	36
3.6.2.1	全般	36
3.6.3	予備性能検証（フェーズ-A, B, C での検証）	37
3.6.3.1	全般	37
3.6.4	最終的機能および性能検証	37
3.6.4.1	全般	37
3.6.4.2	解析による検証	37
3.6.4.3	搭載ハードウェアとソフトウェアによる検証	37
3.6.5	軌道上評価	38
3.7	運用・維持・廃棄	38
3.7.1	全般	38
3.7.2	運用・維持	38
3.7.3	廃棄	38
付録1	制御系設計標準関連文書体系	39
付録2	制御系設計プロセスに対する要求事項適用方針	40

1. 総則

1.1 目的

宇宙システムに適用される制御系を開発するには多様な技術分野との連携が必要である。また、制御系はこれらの多くの分野を統合する一つの大きなシステムを構成することが多く、その開発には上位システムとの連携及びそれ自体にもシステムズエンジニアリングの手法を取り入れた開発管理が必要となる。このように宇宙システムの制御系の開発に関するシステムズエンジニアリングを制御エンジニアリング（CE: Control Engineering）（制御系開発プロセスに関わる全般的な技術活動）と呼ぶこととする。

本標準の目的は、宇宙システムに適用される制御系の開発に必要なシステムズエンジニアリング手法を含む制御系開発の全ライフサイクルにわたる総合的な設計指針を提供することにある。

宇宙システムに適用される制御系の開発に関わる分野は、たとえばシステム設計、電気・電子技術、機械技術、ソフトウェア技術、通信、地上システム、運用等の分野の複雑な制御系の解析、設計、実装等であり、これらについては全て宇宙航空研究開発機構（以下「JAXA」と言う）の標準が整備されている。本標準はこれらの標準と重複するものではなく、これらの標準をどのように制御系開発に適用し統合していくかの指針を提供するものである。つまり、本標準は各種の標準を引用しながら、制御エンジニアリングに特有の項目について適切な標準をシステムチックな技術的手段として体系的に使用できるようにすることを目的としている。これらの理由と制御エンジニアリングの進歩の早さ及び関連分野にデファクトスタンダード（業界標準）があること等により、標準を直接適用して特定の制御系、制御機器を設計、またはインタフェース仕様を記述するレベルにはなっていない。これらの目的に対しては第3階層の技術標準が準備されている。本標準では特定分野の制御系設計、制御機器設計に関して、どの標準を適用すべきかが規定される。

また、本標準は制御系に関する理論及び技術の教科書を意図したものではなく、このような内容は意図的に削除してある。このような目的では第4階層のハンドブック等が整備されており、これらを参照されたい。

1.2 範囲

本標準は宇宙プロジェクトの一部として開発される制御系について扱っている。宇宙セグメント、地上セグメント及び打上げサービスセグメントを含む宇宙システムの全ての要素に適用される。

本標準は、要求定義、解析、設計、製作、検証及び実証、輸送、宇宙機システム試験・運用及び保守を含む宇宙システムの全ての分野、ライフサイクルを適用範囲とする。

適用範囲は宇宙に関する制御エンジニアリングのプロセス全般であると定義され、管理、製品保証とインタフェースを有し、これらがどのように宇宙システムの制御系に適用されるかについて解説している。

特定のプロジェクトに適用する場合には、本標準に示される要求をプロジェクトの条件に合わせてテーラリングする必要がある。

1.3 関連文書

1.3.1 文書体系

制御系設計標準は JAXA の宇宙機（人工衛星・探査機）設計標準として体系化されており、その第2階層の文書である。制御系設計標準関連の文書体系を付録1に示す（関連文書体系を含む）。

1.3.2 適用文書

本標準の適用文書を以下に示す。以下の文書は、この標準に定める範囲においてこの標準の一部をなす。この標準と適用文書との間で矛盾が生じた場合は、特に定めのない限りこの標準が優先する。この標準の使用者は適用文書の最新版の適用について使用者が検討する事が推奨される。

- (1) BDB-06007B システムズエンジニアリングの基本的な考え方 初版
- (2) システムズエンジニアリング推進室長 通達 第19-1号 プロジェクトマネジメント実施要領
- (3) JMR-001B システム安全標準
- (4) JMR-004C 信頼性プログラム標準
- (5) JMR-005A 品質保証プログラム標準
- (6) JMR-006 コンフィギュレーション管理標準
- (7) JERG-2-610 宇宙機ソフトウェア開発標準
- (8) JERG-2-700 運用設計標準
- (9) BDD-06005 JAXA技術成熟度(TRL)運用ガイドライン
- (10) JERG-2-007 人工衛星設計過誤防止基準

1.3.3 参考文書

- (1) JMR-011 リスクマネジメントハンドブック
- (2) ECSS-E-60A Control engineering (14September2004)
- (3) 本標準に関連するハンドブック、マニュアルを以下に示す。
(第3階層、第4階層の文書)
 - (a) JERG-2-510A 姿勢制御系設計標準
 - (b) JERG-2-151 ミッション・軌道設計標準
 - (c) JERG-2-153 指向管理標準
 - (d) JERG-2-152 擾乱管理標準
 - (e) JERG-2-151-HB001 ミッション・軌道設計ハンドブック
 - (f) JERG-2-152-HB101 擾乱管理マニュアル
 - (g) JERG-2-100-HB101 標準座標系・時系利用マニュアル
 - (h) JERG-2-510-HB102 姿勢表現・運動の基礎マニュアル
 - (i) JERG-2-510-HB001 姿勢制御系技術ハンドブック
 - (j) JERG-2-510-HB002 姿勢制御系コンポーネント技術ハンドブック

(k) JERG-2-510-HB003 姿勢制御系検証技術ハンドブック

1.4 用語・略号

1.4.1 用語

ECSS-E-60A からの引用(訳)であり、一般的な用語定義とは異なる場合がある。

(1) アクチュエータ (Actuator)

制御器からのコマンドを、被制御プラントに対する物理的効果に変換する技術システムまたは装置。

(2) 自律性(Autonomy)

システムが人による運用なしに環境の変化や故障等のシステム異常に対処して機能を達成する能力。自動コマンド等による自動運用とは区別される。

(3) 制御(Control)

制御器の一機能のうち、現在のまたは将来の推定状態と目標状態とを整合させるための制御コマンドを導出する機能。

注 本標準では狭い意味で、上記のような定義としたが、広い意味では、現在のまたは将来の推定状態と目標状態とを整合させるための機能全てをさす。

(4) 制御コマンド (Control Command)

制御器からアクチュエータとセンサ(注)への出力。

注 この定義はコマンドインターフェースを持つセンサの場合に適用される。

(5) 制御コンポーネント (Control Component)

全制御系の中で制御目標を達成するために部分的にまたは全体として使用する要素。

(6) 制御フィードバック (Control Feedback)

センサおよびアクチュエータ(注)から制御器へ入力すること。

注 この定義は状態フィードバックを持つアクチュエータに適用する。

(7) 制御機能(Control Function)

制御目標の中の特定の目標を達成するための制御動作の集合。

注 制御機能は通常は必要な入力、境界条件、期待される出力などを指定することで制御器が行う内容を記述する。

(8) 制御モード(Control Mode)

与えられた被制御プラントの構成にもとづき、利用可能なセンサ、アクチュエータ及び制御器の一意のアルゴリズム一式によって実行される全制御系の特定の運用コンフィギュレーション。

(9) 制御モードの移行(Transition of Control Mode)

ひとつの制御モードから他のモードへと移行すること、または変化すること。

(10) 制御目標(Control Objective)

全制御系が達成しなければならない到達目標。

注 制御目標は制御器への要求事項として指令され、環境からの外乱的影響の下にある被制

御プラントに対して指定済みの制御性能を与えるものであり、制御問題の複雑さに応じて、制御目標は極めて低レベルのコマンドから高レベルのミッション達成目標に至るまで、様々に変わり得る。

(11) 制御性能(Control Performance)

全制御系の定量化された能力。

注 1 制御性能は通常被制御プラントの定量化された出力である。

注 2 制御性能はセンサとアクチュエータとを用い、制御器によって決定される。

(12) 制御系(Control System)

全制御系の一部で、被制御プラントに対して指定済みの制御目標を与えることを目的としている部分。

注 制御系には制御器、センサ、アクチュエータの関連の機能全てを含める。

(13) 可制御性 (Controllability)

線形状態方程式で記述されたシステムで、任意の初期状態から有限時間のうちに最終的狀態に導く制御入力が存在することである。

注 この用語は非線形システムに適用される場合もあるが、主に線形システムをその対象としている。

(14) 被制御プラント(Controlled Plant)

制御問題の対象となる物理的システムまたはその一部。

注 1 制御問題とは、当該プラントの真の挙動を適切に修正し、形作り、その環境との（制御できないその他の）相互作用があったとしても、このプラントが当該の制御性能を出すことにある。宇宙システムにとって被制御プラントとは、打ち上げロケット、衛星、衛星群、ペイロード指向システム、ロボットアーム、ローバ、実験設備、あるいはその他の技術システムなどである。

注 2 被制御プラントは、プラントとも呼ばれる。

(15) 全制御系(Controlled System)

あるシステムの制御関連の部分で、指定された制御目標を達成する部分。

注 全制御系には制御系と被制御プラントとを含める。

(16) 制御器 (Controller)

被制御プラントに指定された制御性能を与えることを目的とする制御コンポーネント。

注 制御器はセンサとアクチュエータとを通じて被制御プラントと相互作用を起こす。その最も一般的な形として、制御器にはハードウェア、ソフトウェア、人間による操作を含めることができる。制御器は宇宙セグメントと地上セグメントに分散して実現することが可能である。

(17) 目標状態 (量) (Desired State)

制御器の目標 (内部基準) について記述して制御コマンドを導出するための変数集合またはパラメータ集合。

注 1 目標状態は主に基準状態によって決定される。例えば、プロファイルの作成による方法がある。

注 2 目標状態と推定状態との差異が主に、制御コマンドの導出のために使用される (図 2-1

を参照)。

(18) 外乱 (Disturbance)

制御性能に悪影響を及ぼし、全制御系の全てのコンポーネントに対して作用する可能性のある物理的効果。

注 外乱の発生源は内部の場合も（全制御系の内部で発生した場合）あるいは外部の場合も（環境から由来する場合）あり得る。全制御系内部で発生する外乱を内部擾乱または単に擾乱と呼ぶことがある。

(19) 環境 (Environment)

全制御系と相互に作用する外部物理的効果の集合体。

注 環境は被制御プラントに限らず、センサ、アクチュエータ、制御器に対してもまた外乱として作用する可能性がある。

(20) 推定状態 (量) (Estimated State)

制御目標を達成するため、測定された状態を使って、ある動的システムの現在の状態または将来の状態を推定すること、若しくは推定された状態。

(21) 推定器 (Estimator)

ある動的システムの現在の状態または将来の状態（推定状態）を測定された状態から決定するためのアルゴリズム。

(22) 誘導 (Guidance)

制御器が持つ一機能のうち、現在または将来の目標状態を決定する機能。

注 目標状態は制御器外で決定される場合もあり、広義にはこれも誘導機能と定義される。

(23) 実現 (実装) (Implementation)

個別の機能をアルゴリズム、ハードウェア、ソフトウェアまたは人間による操作によって実際に現実化させること。または、システムとして機能できるようにすること。

(24) 数学モデル (Mathematical Model)

プラント、全制御系のコンポーネントまたは環境の挙動を数学的に記述すること。

注 数学モデルはアルゴリズム、公式、パラメータで構成される。

(25) 測定された状態 (量) (Measured State)

物理的測定から導出される変数集合またはパラメータ集合。

注 この用語はセンサおよびアクチュエータの制御フィードバックに基づいている。

(26) 航法 (Navigation)

制御器の一機能で、測定された状態から現在または将来の推定状態を求めるための機能。

(27) 可観測性 (Observability)

線形状態方程式で記述されたシステムで、任意の時間における入力と出力の時間応答から、初期状態が決定できる性質。

(28) 量子化 (Quantization)

物理量を最小単位（離散有限単位）の整数倍として処理すること。アナログ・デジタル変換に適用された場合は最小単位（LSBに対応する物理量）が小さいほど、量子化の精度が上がる。

(29) 基準状態 (量) (Reference State)

全制御系に対する制御目標について記述している変数集合またはパラメータ集合。

(30) ロバスト性(Robustness)

全制御系の一特性で、不確定性があるにもかかわらず制御目標を達成できる特性。

注 1 不確定性は以下に分類可能である。

- ・全制御系に作用する外乱が事前に十分に知られていない場合の信号の不確定性
- ・全制御系のパラメータが良く知られていない場合のモデルの不確定性

注 2 ロバスト性を達成するには、こうした外乱に対抗できるかまたは全制御系のパラメータの変動に感応しない適切な制御アルゴリズムを使用する（慣性、剛性など）。

(31) センサ(Sensor)

被制御プラントの状態を測定し、その状態を制御器へのフィードバック入力として提供する装置。

(32) シミュレーション(Simulation)

ある数学モデルをある環境において実行して、そのモデルの挙動を計算すること。

注 このためにはコンピュータプログラムを通常使用する。

(33) 安定性 (Stability)

システムを記述する状態量が、最終的に有限の範囲外に出ないことと定義される（発散しないこと）。

注 厳密には、漸近安定(Asymptotically stable)、大局的漸近安定(Asymptotically Stable in the Large)等の定義があり、初期状態によらず最終的に原点又は目標に収束する大局的漸近安定性が求められる場合がある。制御系設計では制御系の安定性の他に更に広い意味で、力学系の安定性等も考慮する必要がある。

(34) 状態 (量) (State)

ある与えられた時間における全制御系の動特性を記述する変数集合またはパラメータ集合。

注 1 状態は状態ベクトルとも言われる。

注 2 状態は真の挙動、基準挙動、目標とする挙動、測定挙動または推定挙動をそれぞれ記述することが可能である（図 2-1 を参照）。

(35) 真の状態 (True State)

全制御系と環境の実際の挙動を定義する変数集合またはパラメータ集合。真の状態と推定状態の差が推定誤差となる。

注 1 真の状態は知ることができない。

注 2 シミュレーションでは、真の状態とはセンサの測定誤差をすべて除外した上でセンサ、アクチュエータ、プラント、環境を模擬した状態である。

(36) デオービット(De-orbit)

人工衛星の宇宙機をミッション終了後、軌道環境の保全を図る事を目的に運用軌道から離脱させること。地上に落下する恐れのあるものは落下による災害防止処置もとる必要がある。

1.4.2 略号

本標準で使用される主な略語は以下の通り。

3D	Three-Dimensional	3次元
----	-------------------	-----

A/D	Analogue-Digital Conversion	アナログ・デジタル変換
AOCS	Attitude and Orbit Control System	姿勢軌道制御系
A&D	Automation and Robotics	自動化とロボティクス
BOL	Beginning-of-Life	寿命初期
CAD	Computer Aided Design	コンピュータ支援設計
CAE	Computer Aided Engineering	コンピュータ支援工学
CAS	Control Algorithm Specification	制御アルゴリズム仕様
CE	Control Engineering	制御エンジニアリング
D/A	Digital-Analogue Conversion	デジタル・アナログ変換
EGSE	Electrical Ground Support Equipment	電氣的地上支援装置
EOL	End-of-Life	寿命末期
FDIR	Failure Detection, Isolation and Recovery	故障検知分離回復
EM	Engineering Mode	技術モデル
FOV	Field of View	視野
GNC	Guidance, Navigation and Control	航法誘導制御
GPS	Global Positioning System	全地球測位システム
H/W	Hardware	ハードウェア
I/F	Interface	インタフェース
ICD	Interface Control Document	インタフェース管理文書
LOS	Line of Sight	視線方向
MGSE	Mechanical Ground Support Equipment	機械的地上支援装置
MMI	Man-Machine Interface	人間-機械インタフェース
PA	Product Assurance	製造品質保証
PDR	Preliminary Design Review	基本設計審査
PPP	Phased Project Planning	段階的プロジェクト計画法
PSD	Power Spectral Density	パワースペクトル密度
RMS	Root Mean Square	自乗平均
SE	Systems Engineering	システムズエンジニアリング
SEMP	Systems Engineering Management Plan	システムズエンジニアリング管理計画
STM	Structural and Thermal Model	構造・熱モデル
S/W	Software	ソフトウェア
TBD	To Be Defined	未定義
TT&C	Telemetry, Tracking and Command	テレメトリ・トラッキング・コマンド
SOOH	Spacecraft On-orbit Operations Handbook	宇宙機軌道上運用ハンドブック

SOC	Spacecraft On-orbit Checkout Procedure	宇宙機軌道上チェックアウト手順書
SOP	Spacecraft Operations Procedure	宇宙機運用手順書

1.5 単位

国際単位系（SI）を使用する。ただし慣用的に SI によりにがたい場合は慣用的な単位を併記する。

2. 制御系の設計の進め方

2.1 全般

2.1.1 制御系の構成

本標準で取り扱う制御エンジニアリングの範囲を示すために、図 2-1 に一般的な制御系の構成を示す。

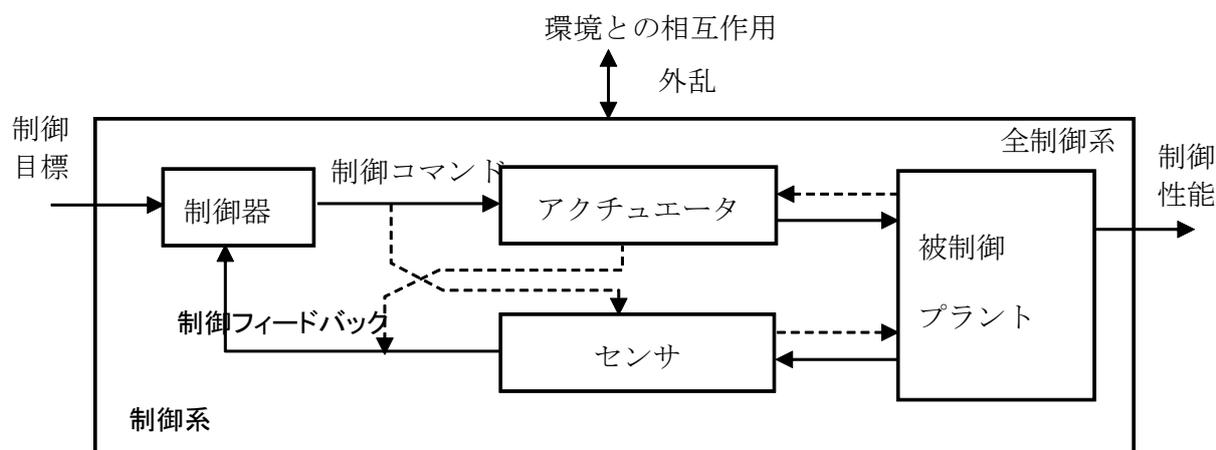
全制御系は『制御目標を達成するための特定システムの内、制御に関連する部分』を指し、制御系（制御目標を達成するために必要な、制御器、センサ、アクチュエータ等の要素からなる）と被制御プラントからなる。

全制御系にはいつもある種のフィードバックループを含む。また、被制御プラントはその挙動または出力が制御（修正または成形）されないと期待されたものにならない物理的なシステムである。本標準が対象とする宇宙分野での適用範囲は被制御プラントがおかれる環境が宇宙空間または他の天体であることによる固有の力学的特性を有するものとし、以下のようなものを含む。

- ・ 人工衛星（その姿勢、軌道）または衛星クラスター
- ・ 人工衛星の再突入及び着陸、又はランデブー、ドッキング
- ・ 指向制御
- ・ ロボットアームシステム
- ・ ローバ
- ・ ペイロード及び実験設備の自動化
- ・ その他、制御を含む全ての技術的なシステム

なお、熱制御については「熱制御系設計標準」（JERG-2-310）に能動的な制御を含めて詳述されていることから本標準の適用範囲外とする。

また、打上げロケットは人工衛星の範囲を超えるため、本標準の適用範囲外とする。



*図 2-1 一般的な制御系の構成

*: ECSS-E-60A Control engineering (14September2004)より

制御エンジニアリングの目的は被制御プラントに環境からの外乱の存在下で制御目標を達成させる（所望の制御性能を達成させる）ことであり、また、そのための制御系を開発することにある。

この目的のため、アクチュエータ（制御器からの指令を被制御プラントにおいて物理的な効果に変換する技術的なシステム又は装置）、センサ（プラントの状態量を測定し制御器に制御フィードバックを供給する装置）等の適切な装置が使用される。図 2-1 には以上の基本的な情報の流れ（古典的なフィードバックループ）が実線で示されている。また、破線で 2 次的な情報の流れまたは物理的な応答が示されている。

複雑なシステムではセンサやアクチュエータ間の信号にクロスカップルが存在する。つまりセンサからのフィードバック信号は制御コマンド等で補正され（補正のためにセンサのパラメータ等のコンフィギュレーションが変更される）、アクチュエータの信号も直接制御フィードバックを補正する。プラントの運動はセンサとアクチュエータに物理的な付随効果をもたらし、センサの作用（働き）によりプラントにフィードバックすることができる。制御目標（制御器に対する基準入力としての）は低レベルのコマンドからミッション目標（火星表面への軟着陸等）までの広い範囲にわたる。後者では制御器、センサ、アクチュエータ及び被制御プラントは多くの階層からなり、適切な低次レベルの階層に分解され、低次レベルの制御から高次レベルの制御への情報の流れもある。

制御性能も低次から高次のものまであり、これに従い、制御器も単純なものから極めて複雑なものまで広い範囲のものがある。一般的には制御器は以下のようなものである。

- ・ デジタルまたはアナログの電子機器、ソフトウェア及び人間による操作
- ・ 宇宙セグメント及び地上セグメント（制御ループが地上を経由して閉じている場合）の要素
- ・ 計画（コマンドのオフライン作成）及び実行（オンライン作業）
- ・ ノミナル及びバックアップ制御（例外処理、故障検知分離回復 (FDIR ; Fault Detection, Isolation and Recovery))

これらの制御器の概念は全制御系における制御器の機能を自動制御等における用語により定義し

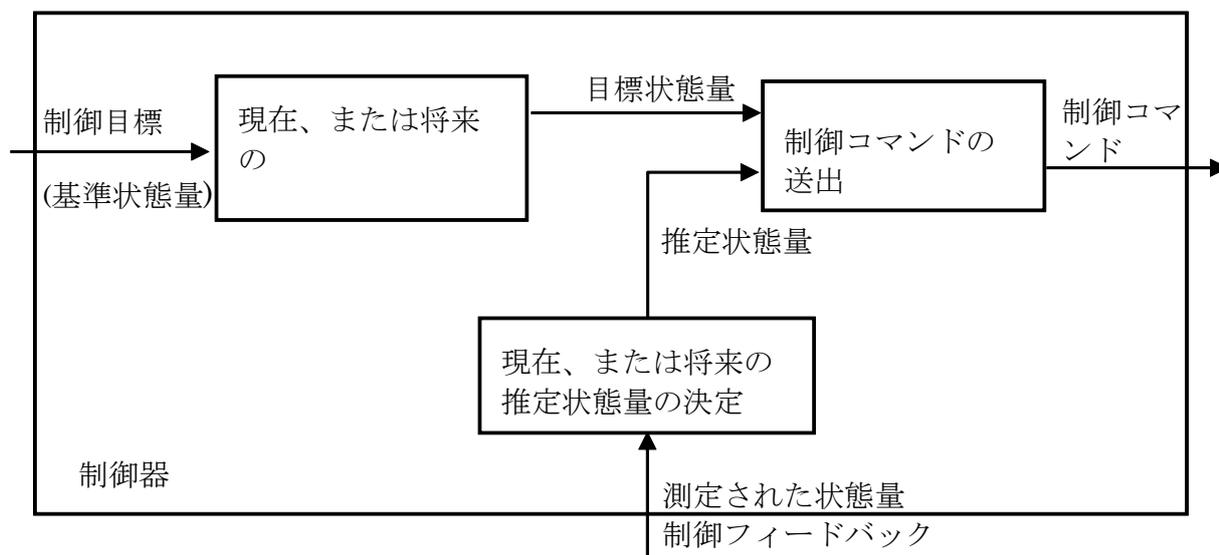
たものである。

ミッションの特定のフェーズまたはモードにおいて、制御機能のハードウェアとソフトウェアと人間による操作、宇宙セグメントと地上セグメント、コマンドの計画と実行への配分は、状況の予測可能性（信頼出来るモデルが利用できるか）、応答時間、利用可能な搭載計算機のリソース、利用可能な通信帯域とカバレッジ、意志決定の複雑さ、開発・運用コスト、許容可能なリスク等をトレードオフして決定される。

人間による運用と地上システムは高次の制御器として制御性能を達成するための必須な要素であり、これらについても考慮することは重要である。運用と地上セグメントについては「運用設計標準」(JERG-2-700)を参照するものとし、ここでは制御系固有の要求についてのみ記述することとする。

古典的な制御理論では制御器は以下のような内部機能構成からなる（図 2-2 参照）。

- ・ 現在、または将来の目標状態量の決定
- ・ 現在、または将来の推定状態量の決定
- ・ 制御コマンドの送出



*図 2-2 制御器の構成例

* : ECSS-E-60A Control engineering (14September2004)より

この機能概念は目標状態量と基準状態量が一致している場合等のいくつかの機能がない制御器についても適用可能であるとともに、軌道全体の計算等を含む現在及び将来の目標状態量の決定等を行う複雑な制御器にも適用できる。航法・誘導・制御 (GNC) システムでは、制御器が持つ図 2-2 に示す 3つの機能は以下の古典的な航法・誘導・制御機能に対応する。

- ・ 現在、または将来の目標状態量の決定 <—> 誘導機能
- ・ 現在、または将来の推定状態量の決定 <—> 航法機能
- ・ 制御コマンドの送出 <—> 制御機能

図 2-2 に示されているような古典的な制御器の機能構成に加えて、本標準で扱う制御器は、制御モ

ード切り替え（制御器内及びセンサ、アクチュエータ）、全制御系及び被制御プラントの状態のモニタ、モデルの更新、FDIR等の全ての機能を含むものとする。

2.1.2 制御系設計作業(設計技術の概要)

前項の様な一般的な制御系の構成から、制御エンジニアリングには最低以下のような作業が含まれることが分かる。

- ・ 制御目標を定義するためのミッション目標の解析
- ・ 被制御プラントのモデリング及び環境との相互作用に関する解析
- ・ 制御要求に関してセンサ、アクチュエータ（構成と特性）のモデリングと解析
- ・ 要求分析と仕様定義、制御器の設計と構成設計
- ・ 制御性能の検証
- ・ 制御系に関わる地上運用、地上検証試験

結果として制御エンジニアリングでは以下のような分野技術を統合するシステムズエンジニアリング活動となる。

- ・ 機構学、力学、宇宙環境とその影響、デジタル、アナログ電子機器、制御理論、計算機システム及びネットワーク、ソフトウェア技術、運用等を含む多面的な分野の知識が必要な技術である
- ・ システムの側面が強く、システムズエンジニアリングとの連携の必要な技術である

2.2 制御エンジニアリングプロセスの定義

制御系の開発に適用される制御エンジニアリングはシステムズエンジニアリングの一部であり、システムズエンジニアリングと密接に連携して作業が進められる。全制御系の様な大規模なシステムを高い品質を保ちながら確実に効率よく開発するために、段階的プロジェクト計画法（PPP: Phased Project Planning）が用いられている。PPPでは、開発全体をいくつかのフェーズに区分し、各フェーズで行うべき作業内容を段階的に定義する。そして、それぞれのフェーズにおける結果を審査により評価し、次フェーズへの移行可否を判断しながらフェーズを進めていく。この一連の流れをプロジェクトのライフサイクルと呼び、一般的に以下のようなフェーズに分割される。

フェーズ-0～フェーズ-A —— ミッション要求定義、システム要求の決定。概念設計。

フェーズ-B —— システム・サブシステム・コンポーネントの基本設計、試作。予備/基本設計。

フェーズ-C —— 同上の詳細設計（衛星の場合、EM/STM 試験と評価も含む）。詳細設計。

フェーズ-D —— 製作、インテグレーション試験。維持設計。

フェーズ-E —— 打上げ、運用。

フェーズ-F —— 後期運用、廃棄。

各フェーズにおいて、制御エンジニアリングは以下のような作業から構成される。

- (1) 制御系エンジニアリング管理（インテグレーション及び管理）

全制御系を全体的に定義、実現するための、制御に関わる様々な分野をインテグレーションする、プロジェクトの全てのフェーズを通じた作業。

(2) 設計

各フェーズでの設計作業は以下のような作業からなる。

① 要求分析

ミッション及びシステム要求の適切な解釈、一貫性のある妥当な制御要求の導出、下位のコンポーネントの要求定義、それら各要求の状態とトレーサビリティの継続的な監視。

② 解析

制御に関する機能・性能要求に関わる問題を解決するための全てのレベル、または全ての分野の解析。代替案の評価、制御性能検証、試験の補完等を含む。

③ 設計（システム設計及び要素設計）

適切な解析及びトレードオフ作業の支援を受けながら、制御要求を満足する物理的な制御アーキテクチャ及び制御器を設計する作業。設計にはマージンに関する方針に従い、適切な方法により全ての機能・性能を評価し制御系要求として配分する作業が含まれる。

設計プロセスは以下のような作業を含む。

a. システム設計

- ・方式設計（トレードオフを含む）
- ・構成・機能設計

b. 要素設計

- ・制御器設計
- ・コンポーネント設計

c. 実装及び運用設計

(3) 製作・試験

(4) 検証と妥当性確認

全制御系が制御目標及び要求に合致していることを実証する。

(5) 運用・維持・廃棄

これらの制御エンジニアリングに関わる作業は、システム開発の様々なフェーズでの適切な制御系及びそのコンポーネント開発管理のもと、お互いを支援するために並行で実施される。それぞれの相互作用については図 2-3 に示す。

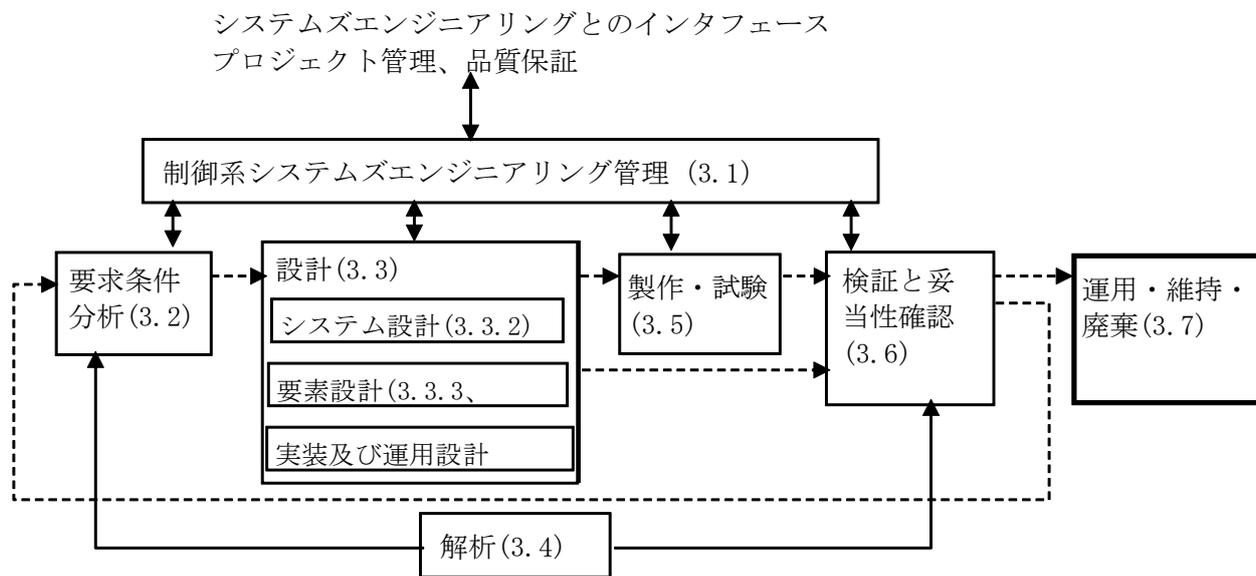


図 2-3 制御エンジニアリング活動間の相互作用 (制御系設計標準)

() 内は各活動に対応する本標準の項番号を示す

表 2-1 にそれぞれの制御エンジニアリング活動のなかで実施されるプロセスをまとめる。

表 2-1 制御エンジニアリングの業務まとめ

制御エンジニアリング活動	制御エンジニアリング業務
制御系エンジニアリング管理（インテグレーション及び管理）	<ul style="list-style-type: none"> ・制御エンジニアリング計画管理： 制御エンジニアリング活動の組織及び計画策定 ・文書及びデータベース管理： システムズエンジニアリングデータベースへのデータ提供 ・インタフェース管理： 他分野（電気、機械、ソフトウェア工学等）とのインタフェース管理と活動（例えば調達管理と品質保証） ・人間工学： 制御器の一部としての人間工学分野との調整 ・配分及びマージン管理： 制御に関する配分及びマージン管理の方針設定 ・コスト効率に関するアセスメント： 制御技術とコスト効率のアセスメント（事前評価） ・リスク管理 ・調達管理： 制御系コンポーネント調達の技術支援 ・コンフィギュレーション管理及び変更管理： 飛行中の保守を含む制御に関する技術変更管理 ・設計能力及びリソース管理： 制御エンジニアリングに関する能力及び資源に関するアセスメント（事前評価） ・安全管理、信頼性管理及び品質保証
要求分析	<ul style="list-style-type: none"> ・ミッション及びシステム要求から制御要求の作成 ・制御要求とシステム要求との調整 ・制御系を構成する下位の要素及びコンポーネントに対する要求配分 ・ソフトウェア要求の定義 ・制御系コンポーネント間のインタフェース要求定義 ・制御系運用要求定義 ・制御系検証要求定義（試験検証を可能にするための設計要求を含む）
解析	<ul style="list-style-type: none"> ・適切な解析ツール及び解析方法の選定 ・要求評価及び配分の詳細化 ・外乱評価 ・コスト、スケジュール、リスク等のプログラム制約を含めた要求の観点から制御系構成を定義するために必要な数値的なトレードオフ ・制御系設計を支援する数値解析 ・性能検証解析（シミュレーションを含む） ・軌道上評価のための数値解析

制御エンジニアリング活動	制御エンジニアリング業務
設計（システム設計・要素設計）	(1) 制御系システム設計 <ul style="list-style-type: none"> ・ 方式設計（システムトレードオフ） ・ 機能・構成設計：制御系機能の構成定義（機能インタフェースを含む） ・ 運用モード設計：運用構成（モード）の定義 ・ コンポーネント要求設計 ・ インタフェース設計 ・ 地上検証試験が可能な設計 ・ システムコンフィギュレーション管理支援 ・ 設計過誤の防止 (2) 制御系要素設計 <ul style="list-style-type: none"> ・ 制御器設計：物理的アーキテクチャの定義 （H/W、S/W、人間による運用） ・ 制御概念、アルゴリズム設計 ・ 制御系トレードオフ ・ 制御系コンポーネント調達支援
検証と実証	<ul style="list-style-type: none"> ・ 検証・妥当性確認に関する戦略の定義（試験環境要求の仕様化を含む） ・ 解析及びプロトタイプによる性能の予備検証 ・ 解析による機能・性能の最終検証 ・ ハードウェアインザループ試験による全制御系 （H/W, S/W, 人間による操作）の最終検証・妥当性確認 ・ 飛行時挙動による全制御系の妥当性確認
運用・維持・廃棄	<ul style="list-style-type: none"> ・ 運用・維持・廃棄要求の設定 ・ 運用要求にしたがって運用に必要な情報をまとめる ・ 運用文書の整備、運用・維持管理支援 ・ デオービット等を含む廃棄運用支援

制御器の機能仕様が規定された後は、ソフトウェア、ハードウェア及び地上検証試験・運用支援等、いくつかの部門で並行してまたは系統的に、制御エンジニアリングプロセスとしての設計及び開発（または調達）作業が実施される。結局制御エンジニアリングプロセスは以下のようなものである。

- ・ システムズエンジニアリングと下位の部品又はコンポーネントエンジニアリング間の相互反復プロセスである。制御エンジニアリングプロセスはこれらの相互反復プロセスを実現するためのものである
- ・ 基本設計から検証、飛行時における妥当性確認までのプロセスである。プロジェクトにおける時系列のフェーズに対する通常の制御エンジニアリング業務及び入出力を 2.3 項に示す
- ・ 特に、要求分析、機能・構成設計、検証・妥当性確認及び解析の相互反復のプロセスである

2.3 プロジェクトの各フェーズにおける制御エンジニアリング業務

プロジェクトの各フェーズにおける主要な制御エンジニアリング業務と主な入出力を*表 2-2～表 2-5に示す。

* : ECSS-E-60A Control engineering (14September2004)より

表 2-2 制御エンジニアリングの業務及び人出力の定義、フェーズ 0/A (概念設計)

	制御エンジニアリング管理(インテグレーション及び管理)	要求分析	解析	設計(制御系システム設計・要素設計)	検証と実証	運用・維持・廃棄
入力	<ul style="list-style-type: none"> システム開発スケジュール システム開発方針及び制約 	<ul style="list-style-type: none"> システムの目標 ミッション要求 システム性能要求 地上検証試験要求 	<ul style="list-style-type: none"> 全制御系目標 概念設計段階での制御系要求 	<ul style="list-style-type: none"> 類似宇宙システムの制御系設計コンセプト 	<ul style="list-style-type: none"> システム検証妥当性確認手法 	<ul style="list-style-type: none"> 運用・維持・管理要求
業務	<ul style="list-style-type: none"> 制御系開発コスト、スケジュールの第一回アセスメント システム開発方針に対する入力作成 利用可能な制御系技術の識別(成熟度の評価) 	<ul style="list-style-type: none"> システム及びミッション要求から概念設計段階での制御目標への翻訳 概念設計段階での制御要求定義 制御系のライフサイクルの定義 地上検証試験項目(宇宙機システムレベルを含む)を考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 制御系代替案に関する制御要求フィージビリティ解析 概念設計段階での外乱解析 概念設計段階での性能アセスメント 初期感度解析 クリティカル分野の識別 	<ul style="list-style-type: none"> 制御系設計コンセプトの確立及びトレードオフ 制御系設計のベースラインの確立(概念設計段階での FDIR コンセプトを含む) 	<ul style="list-style-type: none"> 検証・妥当性確認方針定義のための制御エンジニアリングによる支援 制御系検証・妥当性確認方法及び方針の概念設計段階での定義 	<ul style="list-style-type: none"> 運用・維持・管理要求を概念設計段階での制御目標への翻訳
出力	<ul style="list-style-type: none"> プロジェクト計画及びシステムズエンジニアリング計画(SEMP)に対する入力 コスト、スケジュール見積もりへの入力 技術開発計画への入力 	<ul style="list-style-type: none"> システム要求文書への入力 	<ul style="list-style-type: none"> 制御系解析結果 	<ul style="list-style-type: none"> 概念設計段階での制御系設計及び解析報告 	<ul style="list-style-type: none"> 開発及び検証計画への入力 	<ul style="list-style-type: none"> システム要求文書への入力

表 2-3 制御エンジニアリングの業務及び人出力の定義、フェーズ B (予備/基本設計)

	制御エンジニアリング管理(インテグレーション及び管理)	要求分析	解析	設計(制御系システム設計・要素設計)	検証と実証	運用・維持・廃棄
入力	<ul style="list-style-type: none"> フェーズ 0/A プロジェクト計画及びコスト見積もり 制御ライフサイクルフェーズ 0/A 	<ul style="list-style-type: none"> システムの目標 システム試験計画 ミッション要求 全制御系の目標及び要求 	<ul style="list-style-type: none"> フェーズ 0/A シミュレーションモデル フェーズ 0/A 制御解析 	<ul style="list-style-type: none"> フェーズ 0/A 制御系設計 	<ul style="list-style-type: none"> システム検証計画 フェーズ 0/A 制御系検証計画 	<ul style="list-style-type: none"> 運用・維持・管理要求
業務	<ul style="list-style-type: none"> 制御系からのシステムズエンジニアリング管理計画及びコスト見積もりへの入力のアップデート(リスク管理を含む) 制御系とシステム設計及び制約の適合性見直し 	<ul style="list-style-type: none"> システム要求分析(宇宙機システムの打ち上げ前地上検証試験からの要求対応設計を含む) 全制御系要求作成 全制御系要求のサブシステム、コンポーネントへの配分 全制御系要求のシステム要求に対するトレーサビリティ確認 	<ul style="list-style-type: none"> サブシステム、コンポーネント要求分析 外乱評価 全制御系性能解析 全制御系感度解析 初期プロトタイプに適用する制御技術アセスメント 	<ul style="list-style-type: none"> 制御系ベースライン定義 制御系機能の H/W、S/W、人間による操作(飛行中及び地上)への配分 全制御系インタフェース定義 制御器(制御則)の予備設計 制御関連 FDIR の予備設計段階での定義 制御系コンポーネント及び技術の選定 制御系関連の配分及びマージンの確立 	<ul style="list-style-type: none"> 全制御系検証計画策定 下位レベルの管理計画への入力 フェーズ C/D 検証計画支援 	<ul style="list-style-type: none"> 運用・維持・管理要求分析 要求がある場合は廃棄機能設計
出力	<ul style="list-style-type: none"> プロジェクト計画及びシステムズエンジニアリング管理計画(SEMP)に対する入力 コスト、スケジュール見積もりへの入力 	<ul style="list-style-type: none"> システム、サブシステム技術仕様書への入力 下位の技術仕様への入力 要求データベースへの入力 インタフェース管理文書への入力 	<ul style="list-style-type: none"> 全制御系解析報告(シミュレーションモデル記述を含む) 	<ul style="list-style-type: none"> 制御系設計及び解析報告(設計正当化を含む) 予備/基本設計段階の制御則仕様 予備/基本設計段階での制御系配分 	<ul style="list-style-type: none"> 全制御系検証計画 全制御系予備/基本設計での検証報告 	<ul style="list-style-type: none"> システム、サブシステム技術仕様書への入力

表 2-4 制御エンジニアリングの業務及び人出力の定義、フェーズ C/D (詳細設計・維持設計)

	制御エンジニアリング管理(インテグレーション及び管理)	要求分析	解析	設計(制御系システム設計・要素設計)	検証と実証	運用・維持・廃棄
入力	<ul style="list-style-type: none"> フェーズ B プロジェクト計画とコスト見積もり フェーズ B 制御ライフサイクル 	<ul style="list-style-type: none"> フェーズ B 制御目標及び要求 フェーズ B 制御コンポーネント仕様 	<ul style="list-style-type: none"> フェーズ B シミュレーションモデル フェーズ B 制御解析 	<ul style="list-style-type: none"> フェーズ B 制御設計及び設計の正当化 	<ul style="list-style-type: none"> フェーズ B 制御系検証計画 	<ul style="list-style-type: none"> 運用・維持・管理要求 システム、サブシステム技術仕様書
業務	<ul style="list-style-type: none"> システムズエンジニアリング、プロジェクト管理支援(リスク管理を含む) 制御系変更管理 運用支援 データパッケージ審査 フェーズ E/F 計画とコスト見積もり支援 	<ul style="list-style-type: none"> 仕様の更新 全制御系要求変更のアセスメントと審査 制御系に関わるシステム要求変更のアセスメントと審査 	<ul style="list-style-type: none"> 全制御系の詳細な性能分析 感度解析の更新 検証プロセスの支援 飛行時検証プロセスの定義支援 	<ul style="list-style-type: none"> 制御系設計ベースラインの更新 制御系の機能アーキテクチャ及びインタフェースの最終決定 制御器(制御則)の詳細設計及び制御器パラメータの最適化 制御系関連 FDIR の詳細設計 制御系関連の配分及びマージン解析の審査 	<ul style="list-style-type: none"> 全制御系のモニタ、下位レベルの検証計画及び活動の調整と監視 下位レベル検証、受入れ活動の監視 下位レベル認定、受入れ試験の支援、監視 全制御系の認定、受入れ試験実施 	<ul style="list-style-type: none"> 運用・維持・管理要求に従った運用要求を取扱説明書等に記述 運用文書作成支援
出力	<ul style="list-style-type: none"> プロジェクト計画及びシステムズエンジニアリング管理計画への入力更新 SE データベースへの入力 運用ハンドブック又はユーザズマニュアルへの入力 フェーズ E/F のコスト見積もりへの入力更新 	<ul style="list-style-type: none"> システム、サブシステム技術仕様への入力更新 下位の技術仕様への入力更新 インタフェース管理文書への入力更新 	<ul style="list-style-type: none"> 全制御系解析報告 飛行時校正及び性能解析に関する方針定義のための入力 	<ul style="list-style-type: none"> 詳細設計制御系設計報告 詳細設計制御アルゴリズム仕様(制御系 TT&C 仕様を含む) 詳細設計制御系配分 	<ul style="list-style-type: none"> 全制御系検証報告 飛行時検証計画への入力 	<ul style="list-style-type: none"> 取扱説明書 運用文書

表 2-5 制御エンジニアリングの業務及び人出力の定義、フェーズ E/F (運用・後期利用・廃棄)

	制御エンジニアリング 管理(インテグレーション及び管理)	要求分析	解析	設計及び構成設計 (コン フィギュレーション設 計)	検証と実証	運用・維持・廃棄
入力	<ul style="list-style-type: none"> システム運用計画宇宙機システム試験計画 	<ul style="list-style-type: none"> 詳細設計・維持設計でのシステム仕様及び下位レベル仕様 	<ul style="list-style-type: none"> 全制御系要求 全制御系飛行時データ 飛行時データ解析方針 	<ul style="list-style-type: none"> 詳細設計制御系設計報告 	<ul style="list-style-type: none"> 飛行時検証計画 	<ul style="list-style-type: none"> 運用文書
業務	<ul style="list-style-type: none"> システム運用計画支援 宇宙機システム試験計画支援 制御器変更管理 システム廃棄時の制御エンジニアリングによる支援 全制御系のレッスンスラード作成 	<ul style="list-style-type: none"> 全制御系性能と制御目標及び要求との比較 運用中の制御目標と要求変更の明確化 	<ul style="list-style-type: none"> 全制御系運用性能解析 要求された制御器変更解析 	<ul style="list-style-type: none"> 制御器 (制御則) 設計の更新 (変更要求のある場合) 	<ul style="list-style-type: none"> 全制御系運用性能検証支援 システム審査支援 	<ul style="list-style-type: none"> 運用・維持・廃棄支援
出力	<ul style="list-style-type: none"> システム廃棄計画への入力 	<ul style="list-style-type: none"> 制御系関連の新規運用要求 	<ul style="list-style-type: none"> 全制御系運用性能解析報告への入力 全制御系解析報告の更新 ペイロードデータ評価へのインプット 	<ul style="list-style-type: none"> 制御器 (制御則) 設計の更新 (制御系設計報告更新) 	<ul style="list-style-type: none"> 軌道上受入報告への入力 定期的ミッション報告への入力 	<ul style="list-style-type: none"> 運用報告

3. 制御系設計プロセスに対する要求事項

本標準は、基本的、全般的な作業要求のみを定義し、詳細な要求は個別に設定できるように作成されている。制御対象プラントが明確になっており下位の設計標準で要求が規定されているものは、下位の文書の規定に従うものとする。付録2に、制御系に対する信頼度要求、技術成熟度に応じた本標準の要求事項の適用指針を示す。

3.1 制御エンジニアリング管理（インテグレーション及び管理）

各フェーズにおける制御エンジニアリング管理は、制御系開発を統合（インテグレーション）管理する業務であり、システムズエンジニアリング管理に準拠して実施されるものとする。管理文書についてもシステムズエンジニアリング管理で要求される文書に準拠する。図3-1にシステムズエンジニアリング管理として要求される文書を示す。

本項では制御エンジニアリング管理として要求される制御系固有のシステムズエンジニアリング管理要求を記述する。

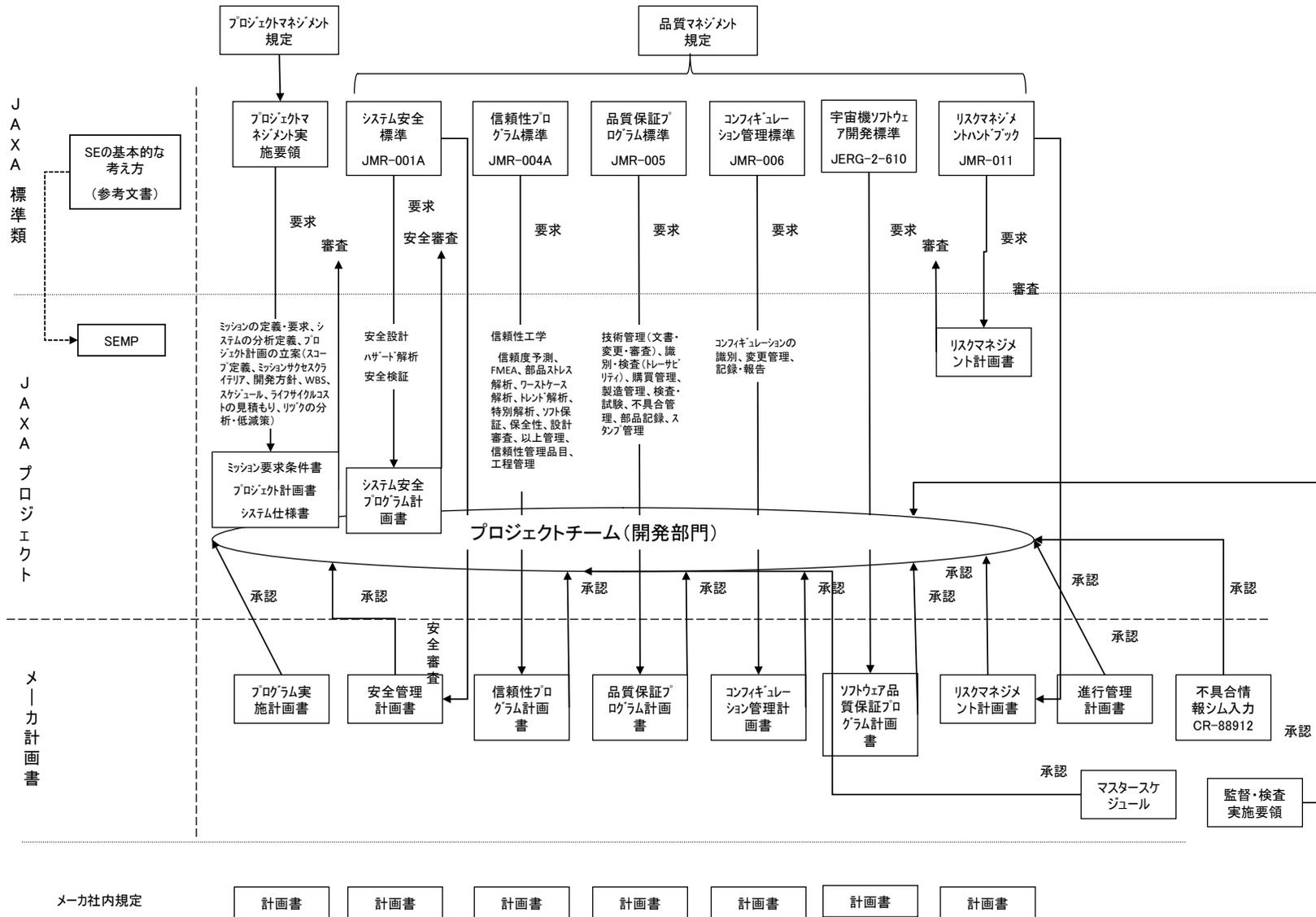


図 3-1 システムズエンジニアリング管理で要求される主要文書と他 JAXA 標準類との関係

3.1.1 全般

制御エンジニアリング管理は、「システムズエンジニアリングの基本的な考え方」（BDB-06007）に準拠して、システムズエンジニアリング活動を実施する。

システムズエンジニアリング管理からの要求がある場合は、これと連携して制御エンジニアリング管理を実施するとともに、制御エンジニアリングの観点からシステムズエンジニアリング管理活動を支援する。また、制御エンジニアリング管理はシステムズエンジニアリング管理計画（SEMP）及びシステムズエンジニアリングに関するインテグレーション及び管理要求と整合している必要がある。

3.1.2 制御エンジニアリング計画管理（活動の組織及び計画）

制御エンジニアリング活動の基本的な作業及び作業計画を記述した制御エンジニアリング管理計画を策定するものとする。システムズエンジニアリング管理からの要求があれば、制御エンジニアリング管理業務には以下の業務が含まれるものとする。

- (1) 要求された制御性能を達成するために必要な全ての制御エンジニアリング活動を計画、組織、定義する。
- (2) システムズエンジニアリングからの要求があればシステムズエンジニアリング管理計画（SEMP）を支援する。
- (3) 制御エンジニアリングは制御の観点からシステム設計、設計変更を評価するために主要なプロジェクト審査に参加する。

3.1.3 技術データ管理（システムズエンジニアリングデータベースへのデータ提供）

システムズエンジニアリングデータベースが設定され、システムからの要求があれば、制御エンジニアリング管理業務として以下の業務を実施する。

- (1) 制御エンジニアリングはシステムズエンジニアリングデータベースに制御器のデータを提供する。
- (2) 制御エンジニアリングはシステムズエンジニアリングデータベースに制御関連のセンサ、アクチュエータのデータを提供する。
- (3) 制御エンジニアリングは全ての開発プロセスに互って、一般的なシステム文書に含めて制御に関する文書の整合性のあるセットを提供する。

3.1.4 他分野とのインタフェース管理（機械技術、ソフトウェア技術等）

- (1) 制御エンジニアリングは関連するシステム・パラメータ、制約、インタフェースを定義し、審査する。他分野とのインタフェースとしては以下の様なものを含む（例）。
 - ① 電氣的インタフェース
 - ② 機械的インタフェース
 - ③ 熱的インタフェース
 - ④ ソフトウェアインタフェース
 - ⑤ 地上セグメントインタフェース（地上検証試験装置とのインタフェースを含む）
 - ⑥ 運用インタフェース（運用軌道に対する要求を含む）
 - ⑦ TT&C インタフェース
 - ⑧ 視野インタフェース
- (2) 制御関連のシステム・パラメータ、制約、インタフェースはシステムレベルで承認されていること。

3.1.5 制御器の一部としてのマンマシンインタフェース管理

制御エンジニアリングは人間が制御ループの中に入る場合に人間工学の活動を支援する。

このようなシステムでは以下の様な項目が検討される必要がある。

- (1) 人間の機能特性・能力
- (2) マン-マシン・インタフェース
- (3) 制御運用訓練

3.1.6 配分及びマージン管理の方針設定

制御系が複数の要素から構成される場合、各要素に対する要求の配分については、設計プロセスに適合した積み上げ法を定義する必要がある。また、各設計プロセスで管理すべきマージンを設定するとともにマージン管理に関する方針を確立し、適用するものとする。

3.1.7 制御技術とコスト効率のアセスメント（事前評価）

基本的にはフェーズ 0/A の業務として実施される。

- (1) 「プロジェクトマネジメント実施要領」（システムズエンジニアリング推進室長通達第19-1号）準用してコスト管理を実施する。
- (2) 技術成熟度に関する評価
 - ① 制御関連技術の技術成熟度に関するプログラム・リスクを解析、評価する。
 - ② 上記評価は以下のようなものについて実施する必要がある。
 - a. 制御器（ハードウェア、ソフトウェア、人間による操作等）
 - b. センサ、アクチュエータ
- (3) 制御目標及び要求に関する検証のための作業内容（コスト、リスク）について評価する。

3.1.8 リスク管理

「リスクマネジメントハンドブック」（JMR-011）に従ってリスク管理を実施する。制御エンジニアリングは技術的な観点からシステムのリスク評価を支援する。

3.1.9 制御系コンポーネント調達の技術支援

制御エンジニアリングは、制御系コンポーネント（ソフトウェアを含む）の調達のための技術支援を行う。

3.1.10 コンフィギュレーション管理（飛行中の保守を含む制御に関する変更管理）

「コンフィギュレーション管理標準」（JMR-006）に従ってコンフィギュレーション管理アイテムを識別し、変更管理等を実施する。

3.1.11 制御エンジニアリングに関する能力及び資源に関するアセスメント（事前評価）

基本的にはフェーズ 0/A の業務として実施される。

- (1) 「プロジェクトマネジメント実施要領」（システムズエンジニアリング推進室長通達第19-1号）を準用して資源管理を実施する。
- (2) 制御エンジニアリングは設計者の制御に関連する能力、経験を評価する。
- (3) 制御エンジニアリングは以下の様な制御に関連する資源管理を実施する。
 - ① 人的資源
 - ② 手法／ツール／データ

3.1.12 安全管理

1.3.2 節(3) 項 「システム安全標準」（JMR-001）に従って管理する。

3.1.13 信頼性管理

1.3.2 節(4) 項 「信頼性プログラム標準」（JMR-004）に従って管理する。

3.1.14 品質保証

- (1) 1.3.2 節(5) 項 「品質保証プログラム標準」（JMR-005）に従って管理する。
- (2) ソフトウェアに関しては1.3.2 節(7) 項 「宇宙機ソフトウェア開発標準」（JERG-2-610）に従って管理する。

3.2 要求分析及び要求事項の管理

3.2.1 全般

要求分析及び要求事項を管理する業務を要求工学と定義する。本項では制御エンジニアリングに係わる要求工学の活動に対する要求を規定する。

要求工学の適用対象となる制御要求は、以下の3種類に分けることができる。

- (1) システムからの要求、設計制約

制御系はミッション及びシステム要求（インタフェース条件、運用要求、地上検証試験要求を含む）を直接実現する必要がある。システム構成が制御系の設計制約条件となる場合がある。これらの要求に対してはシステムを支援して要求分析するとともに、以下のように全制御系の満たすべき要求事項として管理する。
- (2) 全制御系が満たすべき要求

システムレベルの目標から導出され、以下の項目が含まれるものとする。

 - ① 制御器に適用される要求
 - ② センサとアクチュエータに適用される要求
 - ③ 被制御プラントに適用される要求（視野要求または質量特性など）

これらの要求は、指定された制御目標またはその他の制約から導出される可能性がある（全制御系の検証など）。
- (3) 全制御系が地上での操作に対して課する要求または制約。特に、地上処理要求など。

要求分析及び要求事項の管理のプロセスでは、制御系開発の表 2-2 から表 2-5 までに定義する各フェーズにおいて、上記(1)項の要求を分析し、制御系に対する要求として展開するとともに、制御エンジニアリング管理等で実施される変更管理等を支援する。

要求分析にあたっては実績ある解析手法等を利用するものとする。制御系の要求分析では、1.3.3 項の参考文書が利用可能である。

また、システム設計作業と連携して(2)、(3)項の作業を実施し、要求条件書、仕様書等を作成、管理する。必要に応じ制御要求とシステム要求との調整を行う。

制御エンジニアリングにおける要求分析及び要求事項の管理は以下のような作業からなる。

- (1) システムレベルの要求分析
 - ① ミッション要求分析支援
 - ② システム要求分析支援
 - ③ 信頼性要求、FDIR 要求の分析
- (2) サブシステムレベルの要求分析
 - ① 上記システムレベルの要求を制御系要求に翻訳する。
- (3) 制御要求の作成（仕様書、条件書の作成）

3.2.2 要求分析

- (1) システムレベルの要求分析
 - ① ミッション要求分析支援

ミッション要求を分析し、制御系のシステム要求定義を支援する。フェーズ 0/A でシステム支援作業を実施する。ミッション要求のうち姿勢・軌道等にかかわるものは、1.3.3 節(2)(b)項「ミッション・軌道設計標準」（JERG-2-151）に規定された手法により分析する。
 - ② システム要求分析支援

システム要求（インタフェース条件、運用要求、地上検証試験要求を含む）を分析し、制御系への要求を確立する作業を支援する。フェーズ-A、B でシステム支援作業を実施する。
 - ③ 信頼性要求、FDIR 要求の分析

ミッション及びシステム要求（安全要求を含む）を分析し、制御系の基本的な信頼性要求、FDIR 要求を定義する。これらの作業はフェーズ-A、B においてシステム支援作業として実施する。これらのフェーズで定義される基本的な信頼性要求、FDIR 要求は以下のようなものが含まれる（例）。

 - a. 単一故障点に関する考え方
 - b. 二重故障時の運用可能性レベル

c. 故障耐性に関する基本的考え方 (One Fail Operational, Two Fail Safe 等)

(2) サブシステムレベルの要求分析

① 上記システムレベルの要求を制御系要求に翻訳する。

3.2.3 制御要求の作成

制御要求は、前項の要求分析結果に従い、制御系の仕様書等の形でまとめられる。制御要求は直接的にミッション及びシステム要求事項から導出されるが、他のシステム（電力、機器配置、熱条件および運用など）から課せられる制約についても考慮に入れること。

(1) 要求の配分

システムレベルでの要求は制御系及びその構成要素に配分される。

制御要求の配分にあたっては以下の事項に配慮する必要がある。下位レベルへの要求の配分は、通常は反復プロセスであり、設計段階を通じて繰り返し実施される。

① 制御要求は、制御系コンポーネント（制御器、センサ、アクチュエータ）に対する下位レベルの要求に配分される。さらに制御系コンポーネント間のインタフェース要求が定義される。またソフトウェアに対する要求の定義がされること。

② 上記①項の配分作業では以下を援用する。

- a. 解析作業（配分を中心とした解析及びシミュレーション）
- b. 試験（既存の装置またはブレッドボードによる試験）

(2) 要求トレーサビリティ

制御要求はシステム要求と整合していることが確認できるよう設定されるものとする。

(3) FDIR要求

制御要求としてシステムFDIR要求や故障管理に関する定義を考慮すること。

(4) システム要求作成支援

制御系の要求事項の管理として、システム要求工学を支援して要求事項の間での矛盾点、要求事項の曖昧な点、要求事項と環境要素との間または要求事項と設計制約事項との間での矛盾点などを特定し、解決する。

(5) 制御系検証要求定義

制御系が要求を満たすことを地上検証試験において確認するための手段、およびフライト状況との差を加味してその検証手段の妥当性を考慮する。

(6) 要求の文書化

制御エンジニアリング業務として制御系に対する要求事項は文書化（仕様書、条件書、ICDなど）されオーソライズされること。制御系に対する特殊なシステム制約（プルーム効果限界に対する最小許容可能スラストキャンタ角、センサ視野、アクチュエータの動作範囲、アラインメント、機械的剛性、固有振動数など）もしかるべき文書(ICD等)として文書化されること。

3.3 制御系設計

3.3.1 全般

制御エンジニアリングにおける設計プロセスは、以下の業務から構成される。

- (1) 制御系システム設計
- (2) 要素設計

制御系のシステム設計を実施した後、制御系の構成要素の詳細な設計を行う。

一般的にはプロジェクトフェーズC以降の作業となるが、システム設計において開発リスクが高いと評価された要素についてはフェーズBにおいて試作のための設計を実施する。制御系の構成要素としては以下のものを含むものとする。

- ① 制御器設計
- ② 要素設計
- ③ 実装・運用設計

制御系の設計にあたっては、実績ある設計手法等を利用するものとする。設計手法に関しては、1.3.2項の参考文書が利用可能である。

3.3.2 システム設計

3.3.2.1 全般

プロジェクトの初期（フェーズ0/A）には要求分析の結果として設定された制御系の機能・性能要求を満足する基本的システム構成を確立する。

フェーズB以降では、詳細なシステム構成と各コンポーネントへの機能・性能の配分を行う。

システム設計としては以下のような作業を実施する。

- (1) 方式設計（トレードオフを含む）
- (2) 制御アルゴリズム設計
- (3) 運用モード設計
- (4) 構成設計
- (5) 機能設計
- (6) コンポーネント要求設計
- (7) インタフェース設計

3.3.2.2 方式設計

プロジェクトの初期フェーズ（フェーズ0/A）から制御エンジニアリングの一環として実施され、制御エンジニアリング管理を支援する。初期フェーズでは制御エンジニアリング管理として実施される各種作業と連携し、要求を実現できるいくつかの方式（基本的な制御アーキテクチャとシステム構成）についてトレードオフし、最適なシステムを選定する。方式設計として実施される作業は以下のようなものを含む。

- ・ 制御要求を実現するために必要な機能を分析し、その機能を実現するための機能アーキテクチャ及びシステム構成案を作成する。
- ・ 制御系の制御概念や被制御プラントとのインタフェースなど、制御系の機能アーキテクチャおよび運用アーキテクチャの設計。このための支援には、分析、シミュレーションまたは事前の試作試験（プロトタイプ作成）などの方法を用いることが可能である。
- ・ 軌道上展開および利用の双方における運用要求事項に従った制御ハードウェア、制御ソフトウェア、人間による操作への制御機能の配分（地上機能と搭載機能間での配分も含む）。
- ・ 制御系の物理的アーキテクチャを詳細に設計し、ハードウェアとソフトウェアの全ての機能の実行を定義する。

上記の手順は原則として連続して実施される。但し、時として反復プロセスを使用する場合もある。システムの制約がある場合には、これら手順の一部を省略する（既存の設計または試験結果の再利用など）。

フェーズB（予備設計段階）では、トレードオフにより概念とアーキテクチャの選択を支援し、性能、コスト、スケジュール、リスクなどの最適化を可能とする。

3.3.2.3 制御アルゴリズム設計

制御エンジニアリングのシステム設計プロセスの一環として、制御系を特徴づける制御アーキテクチャ、制御理論、制御アルゴリズムを決定する。制御アーキテクチャ、制御理論及び制御アルゴリズムは運用モード及び制御系構成と一体となったものであり、制御系設計の初期フェーズでは、これらを一体化してトレードオフを実施する。制御系の方式が設定された後は、各運用モード毎に制御要求を満足するための制御アルゴリズムを確立する。制御アルゴリズム設計の結果は運用モード設計等への設計条件となると共に、コンポーネント設計（制御器等）への要求条件となる。

3.3.2.4 運用モード設計

制御エンジニアリングのシステム設計プロセスの一環として、運用アーキテクチャを定義する。この運用アーキテクチャは制御系の正常時及び異常時に対応する全ての運用条件をその適用対象とする、制御モードとモード間移行とで構成されている。運用モード設計では制御要求を満足するために必要な機能をいくつかの制御モードに分割する。機能の構成と制御モードへの配分は、センサ、アクチュエータ、制御器、その他運用品目の利用方法についての既存の一般的知識（経験、実績）を活用する。以下運用モード設計として実施すべき事項を示す。

(1) モード機能の定義

それぞれの制御モードについて、関連する機能を定義し、構成される要素（ハードウェア、ソフトウェア、運用者、地上設備、搭載機器等）へ機能配分する。また、制御モードの妥当性確認条件を設定する。

(2) モード移行条件の定義

① モード間の移行条件を特定する。

- a. 開始条件（前モードおよび開始条件）
- b. 移行を発生する場合（トリガ条件）
- c. 終了条件（事後モードおよび終了条件）

② 移行時に実行すべき機能について定義する。

3.3.2.5 機能設計

機能設計プロセスは「機能分析」とも呼ばれ、制御目標を制御系機能へと翻訳する作業から構成される。通常上位の制御目標、機能要求から下位の機能要求へ機能を展開するプロセスが利用される。

機能の論理的構成により制御モードおよびモード間移行の一組からなる機能アーキテクチャまたは運用アーキテクチャを作成する。

3.3.2.6 構成設計

システム構成（物理的アーキテクチャ）とは、制御目標を達成するために使用するコンポーネントの集合体（センサ、アクチュエータ、制御器および被制御プラント。ソフトウェア及びハードウェアから構成される）のことをいう。制御系の設計において制御エンジニアリングでは、これら物理的要素の限界を考慮に入れて、実行可能な設計を達成する。制御エンジニアリングでは更に、これらの要素の物理的特性を利用して制御器の設計を行う。これらの作業は、しばしば他の分野と相互に影響を及ぼし合い、複雑なシステムに対してはシステムズエンジニアリングと調整を図った上で実施されることが期待される。構成設計では、性能、冗長性、可観測性、可制御性、運用可能性などに関する制御目標全てを達成するために必要なセンサ、アクチュエータの構成を決定する。

3.3.2.7 コンポーネント設計

構成設計の結果を受けて、システムを構成するコンポーネントについて、制御系としての機能・性能の他、システムを成立させるための基本的な要求を定義する。システム設計として実施しておくべきコンポーネントに対する作業は以下のものを含む。

- (1) センサの構成及び基本的な要求の設定
- (2) アクチュエータの構成及び基本的な要求の設定
- (3) 制御性能に影響を及ぼすシステム動力学や運動学などに関して、被制御プラントの設計を支援する。
- (4) 選択した被制御プラントの物理的コンフィギュレーションが、制御系設計と適合性のあることを検証する。
- (5) 制御エンジニアリングは、制御性能に影響を及ぼす電氣的インタフェースに関して、電氣的シス

テムアーキテクチャの設計を支援する。

- (6) 制御エンジニアリングは、制御性能に影響を及ぼす処理能力、データ速度、入出力、メモリーなどに関して、搭載データ処理アーキテクチャの設計を支援する。
- (7) 制御エンジニアリングは、特に制御コンポーネント設計が、環境条件に起因する物理的特性の故障または予測される劣化（BOLおよびEOL）に適合可能であることを検証する。

3.3.2.8 インタフェース設計

制御エンジニアリングは、系内に地上設備及び他の宇宙機が含まれる場合は、これらのインタフェースを定義するとともに、こうしたインタフェースの定義によって系内の地上設備及び他の宇宙機を含めて制御目標が達成可能であることを検証する。

例 系内の地上設備としては地上の測距設備等、また他宇宙機としては、測位衛星システム（GPS：Global Positioning System）等がある。

GPS等を系内に含む場合はGPSとのインタフェースが定義され、GPSシミュレータ等により検証される。

3.3.2.9 地上検証試験対応設計

宇宙機システムレベル、制御系レベル、制御系コンポーネントレベルにおける全制御系の機能性能が地上検証試験において支障なく確認できるよう考慮して設計するものとする。

宇宙機システムレベルの検証では、システムが一旦組みあがってからのインテグリティ（完全性）を保ちつつ打ち上げ前の地上検証試験が行われるよう、試験装置や治工具とのインタフェースを確保すること。

3.3.2.10 設計過誤の防止

制御系設計に於ける設計過誤防止のために、「人工衛星系設計過誤防止基準」（JERG-2-007）を参照して設計を実施すること。

また、極性・位相、単位等に関する設計過誤は制御系に破局的な不具合をもたらす可能性があるので設計の初期フェーズから管理項目等を明確にしておくものとする。

3.3.3 要素設計 制御器の設計

3.3.3.1 全般

制御器は図 2-1 に示す様に、センサの測定値と制御器へのコマンドとに基づいて（基準入力など）、制御器内の制御アルゴリズムによりアクチュエータに対するコマンドを生成、送出し、制御目標を達成するために被制御プラントを制御する。制御器には、制御のためのアルゴリズムを含むものとし、これらのアルゴリズムは、全制御系（被制御プラントまたは制御コンポーネント）の不確実性や予測される特性変化に対してロバスト性を維持しつつ制御目標を達成できるよう設計される。これに加えて制御器には、制御系のコンポーネントまたはプラントにおいて起こりうる（予想される）故障に反応できるよう設計されているアルゴリズムを持たせることが可能である（FDIR機能）。制御アルゴリズムは、デジタルまたはアナログのいずれの形式でも実行可能である。制御器を構成するハードウェア及びソフトウェアは一般的な電子機器及び搭載ソフトウェアの設計標準に従うものとする。また、制御系設計に於ける設計過誤防止のために「人工衛星系設計過誤防止基準」（JERG-2-007）を参照して設計を実施すること。

3.3.4 要素設計 コンポーネント設計

3.3.4.1 センサ

システム設計の結果を受けてセンサに対する要求をトレードオフして詳細化するとともに、開発仕様書等の形でとりまとめる。

- (1) センサ構成の定義を支援する
- (2) 選択したセンサ構成が制御系設計と適合性のあることを検証する
- (3) 調達支援

3.3.4.2 アクチュエータ

システム設計の結果を受けてアクチュエータに対する要求をトレードオフして詳細化するとともに、開発仕様書等の形でとりまとめる。

- (1) アクチュエータ構成の定義を支援する
- (2) 選択したアクチュエータ構成が制御系設計と適合性のあることを検証する

(3) 調達支援

3.3.4.3 搭載ソフトウェア

制御系固有の要求は、制御アルゴリズム設計、制御器設計からの要求を受けて詳細化し、ソフトウェア開発仕様書等の形で取りまとめる。一般的な要求は「宇宙機ソフトウェア開発標準」(JERG-2-610)に従うものとする。

3.3.5 実装運用設計

3.3.5.1 全般

3.2 項のシステム設計にしたがって各要素の実装設計を実施し、実装に必要な電氣的、機械的な実装部品の設計を行う。また設計結果は製品仕様書、ICD、手順書等として文書化し、管理する。サブシステムレベルで検証の要求があれば、これらの文書に従ってサブシステムレベルでの実装及びインテグレーション作業を実施し、サブシステムでの検証を実施する。また、システムから要求があればシステムへの実装支援を実施する。

3.3.5.2 制御系の運用システムへの実装方法

以下の項目については、インタフェース設計としてシステム側と検証方法を含めて実装方法を調整し、ICD、取扱説明書等として文書化しておくものとする。また、システムから要求があれば、運用システムへの実装手順等の作成及び実装支援を実施する。

- (1) 搭載ソフトウェアの実装 (特に軌道上での再プログラミング)
- (2) アライメント管理
- (3) 極性管理

3.4 解析

3.4.1 全般

解析とは、制御系開発の全フェーズにおいて実施すべき基本的作業であり、以下のような作業からなる。制御系設計に係わる解析はシステム解析と連携して実施されるが、次のようなミッション要求及びシステム要求に直接係わる部分はシステム解析として実施される。

- ・ 「要求分析のための解析」の内、ミッション解析、外乱解析、指向誤差解析など。
- ・ 「システム性能解析」の内、指向誤差解析など。

制御エンジニアリング内では、解析の対象は制御器、センサとアクチュエータ、プラント、環境となる（図 2-1 を参照）。

(1) 要求分析のための解析

- ① ミッション及びシステム要求を分析し、その妥当性及び制御要求との整合性を評価する。ミッション解析、システム解析支援として実施される。
- ② 全制御系の機能・性能を評価し制御要求との整合性を評価する。
- ③ 様々な制御機能の間での要求の配分を支援する。

(2) 設計のための解析

- ① システム設計では以下のような解析が実施される。
 - a. 制御の機能的または物理的アーキテクチャおよび実現法を実際に選択する。
 - b. 代替制御解決法の間でトレードオフを行う。
 - c. 設計リスク要因を特定する。
- ② 要素設計では以下のような解析が実施される。
 - a. 制御系を構成する各要素の機能・性能を評価し制御要求との整合性を評価する。

(3) 検証のための解析

- ① 全制御系の性能とその要求事項との関係について検証するとともに、適用可能な環境内でその性能を検証する。
- ② 制御系試験結果に基づき、全制御系の機能・性能と制御系要求事項との整合性を評価する。
- ③ 飛行時の結果に基づき、全制御系の機能・性能と制御系要求事項との整合性を評価する。

注 1 解析プロセスは、図 2-3 で説明しているように、制御エンジニアリングプロセス全体を支援する。

注 2 解析プロセスは、他の全ての制御エンジニアリング作業と緊密な相互関係を持つ。

注 3 これらの要素を解析する目的は、全制御系に対する制御目標を制御機能及び性能に適切に配分していることを評価することである。

制御系の解析にあたっては実績あるモデル及び解析手法等を利用すること。実績あるモデル及び手法が使用できる場合は、それらモデル及び手法を適用することの妥当性を評価することで 3.4.2 項は適用したものとみなすことができる。実績の無いモデル、手法を採用する場合は 3.4.2 項に従ってモデル及びツールを管理するものとする。

制御系の解析では、1.3.3 項の参考文書が利用可能である。

3.4.2 解析モデル、解析手法及び解析ツール

3.4.2.1 全般

制御エンジニアリングの各プロセス及び制御系開発の各フェーズに対して解析的な手法およびツールを用いるとともに、これらの手法やツールをそれぞれの解析タスク（プロジェクトフェーズごと）に適宜採用する。通常解析手法とツールのリストを表 3-1 にまとめる。

*表 3-1：制御エンジニアリングプロセスを支援する解析作業

制御エンジニアリング作業	解析タスク	通常的手法およびツール
要求分析のための解析	<ul style="list-style-type: none"> - 要求事項の解析 - 要求事項の実現可能性の評価 - 外乱の定量化 - エラー発生源の特定および収支への関連数値の配分 	<ul style="list-style-type: none"> - ミッション解析・軌道設計ツール - 解析的関連性およびモデル - 表計算解析ツール - 制御 CAE ツール - 制御、環境、センサ、アクチュエータおよびプラントなどのモデル
設計	<ul style="list-style-type: none"> - 制御アーキテクチャの定義を支援するための数値的トレードオフ研究 - 制御設計を支援するための数値解析 - 外乱及び擾乱効果の詳細解析 - 安定性 - ロバスト性 - 追加的外乱またはパラメータ外乱への感度 - 適用可能な要求事項に対する性能 - 制御収支数値の統合 	<ul style="list-style-type: none"> - 解析的関連性およびモデル - 表計算解析ツール - 3D CAD システムモデル - 制御 CAE ツール - 閉ループシミュレーション (制御、環境、センサ、アクチュエータ、制御対象プラントなどの詳細モデルを含む) - シミュレーションデータ解析ツール (統計処理など) - 時間・周波数領域法 - 線形および非線形法
検証	<ul style="list-style-type: none"> - 性能解析 - H/W、S/W、ループ内人間などの試験の結果をもとにした試験データ解析 - 飛行時データ解析 - ペイロードデータ評価の支援 	<ul style="list-style-type: none"> - 閉ループシミュレーション (制御、環境、センサ、アクチュエータ、制御対象プラントなどの詳細モデルを含む) - 試験データ評価ツール (統計処理など) - テレメトリデータ処理ツール - 制御 CAE ツール

* : ECSS-E-60A Control engineering (14September2004)より

3.4.2.2 解析モデルの定義

また、解析にあたっては実績のあるモデルを活用するとともに、ミッション解析及びシステム解析用の解析モデルをシステムインタフェース条件として規定するものとする。モデル化の対象は図 2-1 に示す様な制御系の構成要素すべてとし以下のものを含む。

- ・ 制御系 (制御器、センサとアクチュエータ)
- ・ プラント
- ・ 外部環境

解析目的及び開発のフェーズに応じて必要な精度のモデルを使用するものとし、以下のようなモデルを必要に応じて定義する。モデルの個数と詳細な仕様はプロジェクトに応じて決定する。

(1) 簡略化モデル

- ① プロジェクトの初期段階では (フェーズ 0、A および B) 簡略化解析モデルを開発して、制御性能の予備評価を可能とする。
- ② これらの簡略化モデルを使用して、制御要求事項の実現可能性評価や制御誤差バジェット内訳などへの入力データを提供する。
- ③ これらの簡略化モデルを使用して数値的なトレードオフを支援し、代替の制御アーキテクチャや制御概念 (アルゴリズム) を評価するとともに、各種の制御コンポーネント間における選択を行う。

(2) 性能解析のための数学モデル

性能解析のために数学モデルを開発しこれを使用する。数学モデルは、以下の方法により全制御系の性能を評価するための出力データを全て提供する。

- ① 出力を時間領域において直接に評価する。
- ② 入出力データを事後処理する。

(3) 外乱モデル

制御系及びプラント並びに環境から制御系に外乱（以降、外部環境からの外乱を単に外乱と称するものとし、制御系及びプラントで発生する外乱を内部擾乱又は擾乱と称する）として作用する力及び信号をモデル化する。センサ等のノイズも外乱としてモデル化するものとする。

① 内部擾乱発生源（全制御系の内部）

センサ、アクチュエータ、制御器またはプラントのモデルに含まれる。

内部擾乱（アクチュエータ、振動、摩擦、ノイズなど）は、検証済みのパラメータ（製造者データなど）または専用の試験によって識別したパラメータを使用してモデル化する。

② 外乱発生源（環境から）

センサ、アクチュエータ、制御器またはプラントのモデルに含まれる。

③ 誤差源

誤差解析のためのモデルで、誤差源とその性能への影響がモデル化される。

(4) シミュレーションモデル

フェーズC/Dにおいては、制御系の設計を最適化し、また全制御系の検証プロセスを実施する目的で詳細な閉ループ・シミュレーションモデル（すなわち環境、プラント、センサ、アクチュエータ、制御器などを含む）を開発する。

① 全制御系の詳細シミュレーションに使用する数学モデルには以下を含める。

- a. プラントのモデル
- b. センサのモデル
- c. アクチュエータのモデル
- d. 制御器ハードウェアのモデル
- e. 制御器機能のモデル（搭載ソフトウェア）
- f. 関連する外乱及び擾乱発生源のモデル
- g. 環境のモデル（全制御系へ及ぼす制御関連の影響をモデル化する）
- h. 制御信号インタフェースのモデル

② 上記の①項で定義するモデルは、制御問題と適合した数値精度を用いて計算する。

3.4.2.3 解析手法及び解析ツール

制御エンジニアリングプロセスの各段階に応じて、一つまたは二つ以上の解析手法を選択または組み合わせる。また、解析ツールの妥当性は適切な方法で確認するものとし、適切な方法で管理がなされているものとする。

3.4.3 要求分析のための解析

3.4.3.1 全般

システム解析においては、ミッション要求及びシステム要求に対応してミッション解析及びシステム解析を支援する。3.2項で概要を説明している要求条件分析の枠内において、解析を広範囲に使用し、階層的な流れに従って以下を支援する。

- (1) 高位のミッション目標（顧客ニーズ）を実現可能な制御目標へと分解する。
- (2) 全制御系に対する数値要求を定義する。
- (3) 図2-1で示しているように、全制御系に対する要求を様々な制御コンポーネント（制御器、センサ、アクチュエータ）とプラントに対する下位要求に配分する。
- (4) 外乱・擾乱解析等の結果から制御要求等を導出する。
- (5) 解析によって、様々な制御コンポーネントに配分した要求の実行可能性を評価する。

3.4.3.2 ミッション解析・システム解析及び制御エンジニアリング要求分析支援

表2-2から表2-5で定義されるプロジェクトの各フェーズにおいて、ミッション要求またはシステム要求が直接制御系への要求となる軌道、姿勢、指向制御等のシステム要求に関する解析を支援し、これをもとに詳細な制御誤差バジェットを作成するとともに制御コンポーネントの技術仕様への入力デー

タとして使用する。解析によって、制御誤差バジエットの配分を支援する。また、各フェーズにおいて、これらのシステム要求についてシステムのミッション解析及びシステム解析を支援するとともに、解析結果と制御系の要求の整合性を評価する。

ミッション解析に関しては、1.3.3節(2)項「ミッション・軌道設計標準」(JERG-2-151)及び「ミッション・軌道設計ハンドブック」(JERG-2-151-HB001)を参考にすることができる。また指向誤差解析に関しては、1.3.3節(2)項「指向管理標準」(JERG-2-153)を参考にすることができる。

3.4.3.3 外乱及び擾乱解析

制御エンジニアリングでは、図2-1での定義に従って全制御系への外乱と内部擾乱とを定義するための解析を支援する。

プラントを発生源とする外乱はシステム要求に基づいて定義する。外乱及び内部擾乱がシステムの要求条件となっている場合は、システム解析支援として実施し、解析結果と制御系の要求の整合性を評価する。解析はプロジェクトの各フェーズで必要な精度で実施されるものとするが、これらの外乱、擾乱に対して最悪値解析等により制御系のロバスト性が検証されている場合は省略可能である。

3.4.4 制御系性能解析

3.4.4.1 全般

制御系性能解析は制御系設計の一環として実施され、制御系の性能を規定するパラメータを決定するために実施される。また、プロジェクトの各フェーズにおいて全制御系の性能と以下の要求との間で一貫性が確保されていることを評価する。

- a. ミッション要求及びシステム要求からミッション解析及びシステム解析により生成された制御目標
- b. 要求分析のための解析によって定義される数値要求

制御系開発プロセスのプロジェクトの各フェーズにおいて実施される性能解析は以下の通り。

(1) プロジェクトの初期フェーズ (フェーズ0、AおよびB)

- ① 簡略化解析モデルを開発して、制御性能の予備評価を実施する。
- ② これらの簡略化モデルを使用して、制御要求の実現可能性評価や制御誤差バジエットの内訳などへの入力データを提供する。
- ③ これらの簡略化モデルを使用して数値的なトレードオフを支援し、代替の制御アーキテクチャや制御概念(アルゴリズム)を評価するとともに、各種の制御コンポーネント間における選択を行う。

(2) フェーズC/D以降

詳細な数学モデルを使用し、全制御系として要求される機能・性能を満たしていることを確認する。このフェーズではバックアップモード、FDIR機能を含めてシミュレーション解析等により性能評価を実施する。

3.4.4.2 誤差解析

3.4.2.2項で定義された誤差源及び誤差解析手法により、制御目標に対しての誤差を解析し、配分された要求を満足するかを評価する。

制御対象が姿勢及び指向方向である場合は、1.3.3節(2)項「指向管理標準」(JERG-2-153)を参考にすることができる。

制御対象が軌道及び軌道上位置である場合は、1.3.3節(2)項「ミッション・軌道設計標準」(JERG-2-151)及び「ミッション・軌道設計ハンドブック」(JERG-2-151-HB001)を参考にすることができる。

3.4.4.3 安定解析・ロバスト性解析

3.4.2.2項で定義されたモデルを使用し、配分された余裕を満足するかを評価する。

3.4.5 検証解析

最終性能の検証として、ミッション運用シナリオを対象として数学モデルに基づく性能解析を行い、全制御系要求の達成度を以下の観点から評価する。

場合はシステム検証計画の一部とすることが可能である。

制御目標の検証がどの程度実施されたかについて、全制御系設計の成熟度と飛行実績とに従って評価するものとし、制御目標を検証するための方針には、全制御系要求事項が全て満たされていることを実証する能力についても規定する。

また検証計画には以下を含むものとする。

- ・ 制御に対する様々な検証レベルの間の論理関係 (制御コンポーネントのレベル、制御系のレベル、全制御系のレベル)
- ・ 要求を検証するために使用する方法 (部分または完全性能シミュレーション、装置レベルの試験、ループ内ハードウェアの有無を問わない開ループおよび閉ループ試験、など)
- ・ 制御エンジニアリングの検証と妥当性確認のタスクについての記述
- ・ 資源、責任、スケジュール
- ・ 検証のための手順、ツール、設備についての記述
- ・ モデル (検証のためのモデルにはハードウェアを含む開発モデルとシミュレーションモデルを含む) に関する方針

制御エンジニアリング検証タスクは、フェーズを区切り段階的に実施することで、下位レベル (制御系コンポーネント) と上位レベル (全制御系のレベル) の検証のためのタスクとの一貫性を確保する。

全制御系の検証に使用するモデルおよびツールの検証のための戦略を、制御エンジニアリング検証計画の中に含める。

3.6.3 予備性能検証 (フェーズ-A, B, C での検証)

3.6.3.1 全般

リスクを低減させるため、検証プロセスをプロジェクトの初期段階で開始して、制御概念や設計が利用可能となるに従ってこれらの妥当性を確認する。

特に重要な特性について、シミュレーションモデルまたは開発モデル (ブレッドボードモデル、エンジニアリングモデル、プロトタイプ等) を利用して、設計段階および開発段階に検証を行う。

検証に使用するシミュレーションのモデルの表現力と精度およびツールを評価すること。

注 このプロセスは、設計の成熟度に応じて反復的になされる。

3.6.4 最終的機能および性能検証

3.6.4.1 全般

制御系が要求された機能・性能を全て満足していることを保証するための検証で以下の様なレベルで実施する。

- (1) 解析による検証
- (2) 搭載ハードウェアとソフトウェアの検証
- (3) フライト時妥当性確認

3.6.4.2 解析による検証

3.4 項で規定する詳細なモデルを使用し、シミュレーション等により検証する。最終的な機能および性能検証としては以下のものを含むものとする。

- (1) 全制御系の性能を、FDIR動作を含むシステムの動力学条件や幾何学条件に関する定義済みの最悪ケースにおいて実証する。
- (2) 検証の対象には、冗長構成を含め、制御モードやセンサ、アクチュエータの運用時における構成の全てを含める。
- (3) ハードウェア試験が実施された場合はハードウェア試験との整合性を確認する。

3.6.4.3 搭載ハードウェアとソフトウェアによる検証

フライトに供するハードウェア及びソフトウェアを使用し、End to End の試験により検証する。以下の様な項目を含むこと。

- (1) 制御系の搭載ハードウェアコンポーネントの機能および性能を検証する。
- (2) 搭載ハードウェア (またはエミュレータ) 上の搭載ソフトウェアの計算精度を検証する。

注 計算精度は、ハードウェアインザループの試験によるか、または数値シミュレーションとの比較により検証が可能である。

- (3) 制御検証のプロセスには、搭載ソフトウェアと搭載ハードウェアのモデルかまたは搭載品と同等のモデルによる閉ループ試験による機能の妥当性確認を含める。
- (4) 実際のセンサには、EGSEによって入力を与える。
注 入力は、電氣的（試験コネクタ）または物理的（検出器レベル）とすることができる。
- (5) FDIR動作を含めたモード移行を、検証計画に従って試験し検証する。
- (6) 最終統合作業の後、センサとアクチュエータの極性を検証する。

3.6.5 軌道上評価

初期チェックアウトが要求されている場合には、設計段階で軌道上の評価要求に従って評価に必要な情報を取扱説明書、ICD等に規定しておくものとする。また、要求があれば、設計段階で軌道上評価のための運用文書（S00H、SOCP等）を整備する。全制御系の地上からの観測により、妥当性確認が可能なこと。

姿勢制御系の機能、性能、寿命が軌道上環境において要求事項を満足していることを確認するために打上げ・軌道投入後に軌道上評価を行うこと。

設計時に軌道上評価に対する要求事項を明確にし、運用文書（S00H、SOCP等）に明文化すること。要求された軌道上評価を可能とするように姿勢センサ、姿勢制御ソフトウェアおよび、テレメトリ・コマンドを設計すること。

原則として下記の標準およびハンドブック等を参照すること。

- ・ JERG-2-510 姿勢制御系設計標準
- ・ JERG-2-510-HB003 姿勢制御系検証技術ハンドブック

3.7 運用・維持・廃棄

3.7.1 全般

設計段階で運用要求に従って運用に必要な情報（異常時運用のための情報を含む）を取扱説明書、ICD等に記述する。要求があれば、運用文書等を整備するとともに、運用・維持を支援する。

3.7.2 運用・維持

(1) 運用文書

制御系の運用に当たって必要な運用文書（S00H、SOP等）は設計段階で準備され、試験検証段階及び初期チェックアウト段階で検証される。

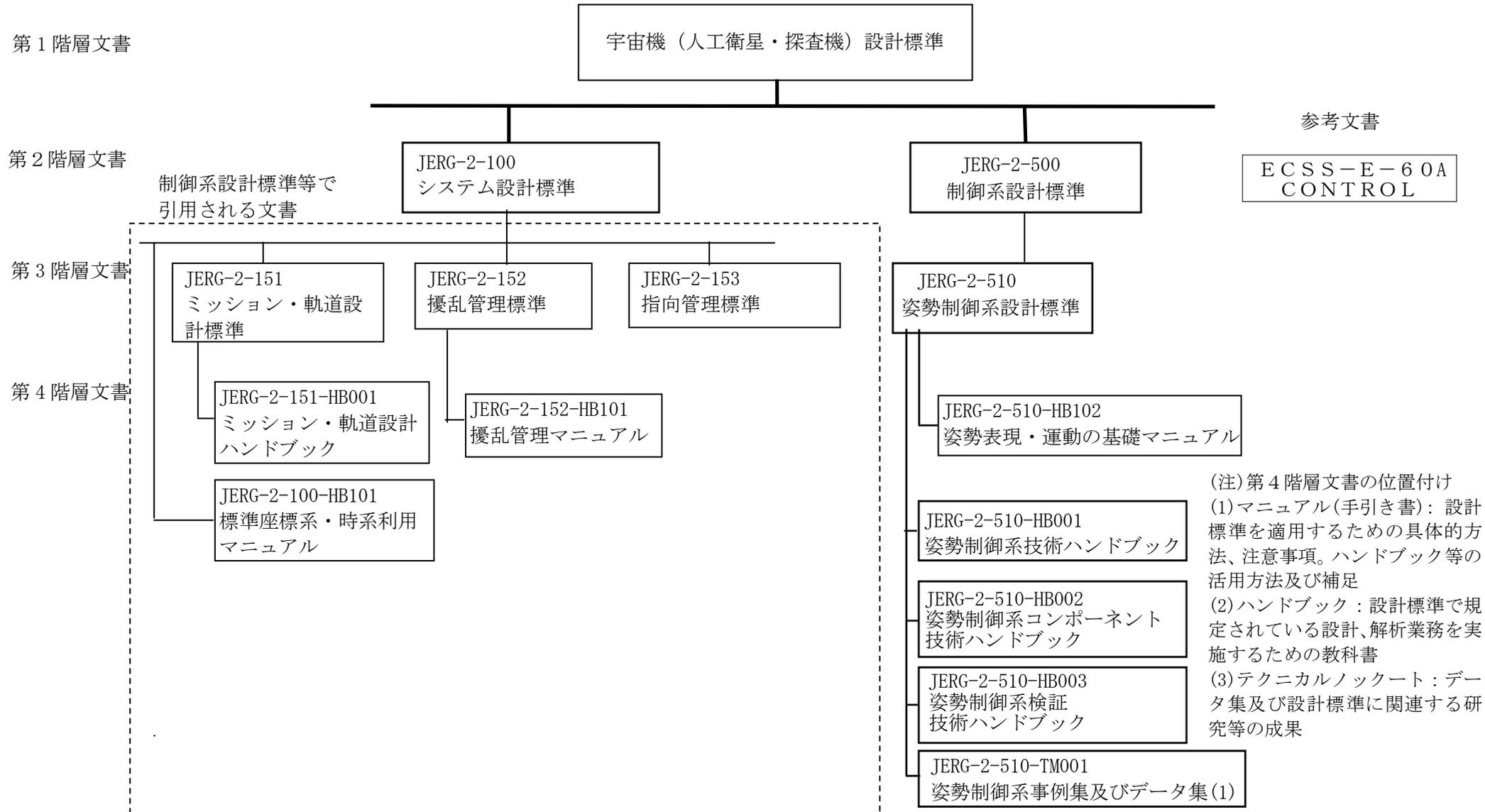
(2) 運用および維持

運用および維持段階でも、制御系に関するフライトデータを取得し、制御系の機能、性能の劣化等をモニタし、運用評価解析を実施する。また、必要に応じて後続する制御系設計の改善等に役立つものとする。

3.7.3 廃棄

デオービット等の廃棄運用が必要な場合は、デオービット等に必要な廃棄運用のための解析を支援するとともに、設計段階で廃棄運用に必要な制御系の機能を組み込むものとする。また、デオービット等の廃棄運用が必要な場合は要求された支援を実施する。

付録1 制御系設計標準関連文書体系



付録2 制御系設計プロセスに対する要求事項適用方針

本標準で扱う制御系の範囲は、人工衛星の制御に係わる以下のような多様なもので、ミッションの定義段階（フェーズ 0）から廃棄までを扱っている。しかしながら、ミッション要求、要求される信頼度及び技術成熟度、契約形態等により設計プロセスに対する要求事項及び要求のレベルは一律ではなく、要求される信頼度及び技術成熟度等にあわせて設定される必要がある。これらの多様な要求の全てに応じるため、本制御系設計標準は基本的、全般的な作業要求のみを定義し、詳細な要求は個別に設定できるように作成されている（逐次第3階層に相当する個別の詳細な標準を整備することとしている）。制御系の開発においては開発の初期段階で、ミッション要求、信頼度レベル、技術成熟度等を考慮して適用すべき要求事項と適用のレベルを設定することが重要である。付録2ではこれらの多様な要求に対して、本標準及び下位の標準を有効に適用するための指針を示す。制御エンジニアリングにおいては要求される作業結果等は文書等として管理するよう要求しているが、本標準では固有の文書を要求していない（本文図 3-1 に示すようにシステムズエンジニアリングとして要求される文書を準用している）。これらの文書類も要求される信頼度レベル、技術成熟度等により個別に設定されるものとする。

(1) 制御系の種類

本標準が対象とする宇宙分野での適用範囲は、被制御プラントがおかれる環境が宇宙空間または他の天体であることによる固有の力学的特性を有するものであり以下のようなものが含まれる。なお、熱制御は「熱制御設計標準」（JERG-2-310）に能動的な制御を含めて詳述されていることから本標準の適用範囲外とする。また、打上げロケットは人工衛星の範囲を超えること等により本標準の適用範囲外とする。

- ・ 人工衛星（その姿勢、軌道）または衛星クラスター
- ・ 人工衛星の再突入及び着陸、又はランデブー、ドッキング
- ・ 指向制御
- ・ ロボットアームシステム
- ・ ローバ
- ・ ペイロード及び実験設備の自動化
- ・ 他の制御を含む全ての技術的なシステム

上記の他、制御系に対する信頼度要求、技術成熟度等により以下のように分類される。

(2) 制御系に要求される信頼度要求

- ・ 信頼度レベルⅠ：ユーザからの高い信頼度要求があり、ミッション期間が長い（実用衛星、バックアップの無い深宇宙探査）
- ・ 信頼度レベルⅡ：ユーザからの高い信頼度要求があるが、ミッション期間が短い（技術試験衛星）
- ・ 信頼度レベルⅢ：信頼度要求が中レベル。信頼度よりコスト要求が優先する（短期ミッション低コスト技術試験衛星）
- ・ 信頼度レベルⅣ：信頼度要求が低い（低コスト技術開発衛星。アマチュア衛星）

(3) 技術成熟度

JAXAではNASAの技術成熟度の指標に従い付図1のような区分を設定し技術成熟度を評価し、それぞれの成熟度に従った開発を実施することとしている。

技術成熟度の区分はプロジェクトにより指定された定義に従うものとするが、制御系設計標準では、表1の区分を以下のように分類し、それぞれの技術成熟度に合わせて設計標準の適用指針を示すこととした。

技術成熟度の区分はプロジェクトにより指定された定義に従うものとするが、制御系設計標準では、技術成熟度の区分を以下のように分類し、信頼度要求と合わせて設計標準の適用指針を表1のとおり示すこととした。

- ・ 成熟度Ⅰ：ミッション及び制御技術が新規 JAXA -TRL 1, 2, 3, 4, 5
- ・ 成熟度Ⅱ：既存技術の改修 JAXA -TRL 6, 7
- ・ 成熟度Ⅲ：完全な既存技術 JAXA -TRL 8, 9

TRL9	-----	実際のモデルの宇宙環境でのミッションの成功を通じた『フライト・プルーフ』 Actual model "flight proven" through successful mission operations (space)
TRL8	-----	実際のモデルの地上ないし宇宙環境での試験ないし実証を通じた『フライト認定』 Actual model "flight qualified" through test and demonstration (ground or space)
TRL7	-----	フライトモデルの宇宙環境(*1)での実証 Flight Model demonstration (space)
TRL6	-----	プロトタイプモデルの地上ないし宇宙環境(*2)での実証 Prototype Model demonstration (ground or space)
TRL5	-----	エンジニアリングモデルの相当環境での検証 Engineering Model validation (in relevant environment)
TRL4	-----	ブレッドボードモデルの実験室環境での検証 Breadboard Model validation (in laboratory environment)
TRL3	-----	クリティカル機能や特性の分析的及び実験的なコンセプト証明 Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of-concept
TRL2	-----	テクノロジーコンセプトやアプリケーションの明確化 Technology concept and/or application formulated
TRL1	-----	基本原理の観察と報告 Basic principles observed and reported

(*1) 実運用で想定する宇宙環境に近い環境(軌道、機器の使用条件等)

(*2) 熱真空環境等の宇宙との類似環境が最低確保されるレベル(長時間の微小重力等、宇宙でしか確保できない環境は宇宙環境が必要)

(注) レベルの判定は、そのレベルの活動が完全に完了して初めてそのレベルが付与されるものとする。

付図1 JAXA 技術成熟度(TRL)区分

(4) 契約形態

本標準は契約形態によらず本標準が適用される制御系開発に必要な制御エンジニアリングプロセスに対する要求を規定している。制御系開発に係わる業務が複数の契約者に亘る場合、及び契約者が開発段階により変更される場合は、適切に業務を重複させ、抜け、落ちの無いようにする必要がある。以下に契約形態に合わせて本標準の適用範囲を設定する場合の目安を示す。

- ① 契約形態としては以下のようなものが考えられるが、何れの場合も 1) システムズエンジニアリング管理業務と制御エンジニアリング管理業務、及び 2) 要求分析及び要求事項の管理等の業務分担を適切に実施する必要がある。
 - a. 人工衛星または宇宙機システム及び制御系を一括して契約
システムズエンジニアリングの一環として実施可能。但し、制御エンジニアリングとしての支援内容を定義する必要がある。
 - b. 人工衛星または宇宙機システムとは独立に制御系のみを契約
システムズエンジニアリングとして実施する業務と制御エンジニアリングとして実施する業務を適切に重複させ、抜け、落ちの無いようにする必要がある。また、システムズエンジニアリングとして実施される業務の支援内容の定義も必要。特にミッション要求等の要求事項の管理については注意が必要である(本標準はミッション要求等を直接制御系で管理することを前提としていない。)
 - c. 人工衛星または宇宙機システムの契約者から制御系のみを契約(要求事項の管理も含む契約)
システムズエンジニアリングとして実施する業務と制御エンジニアリングとして実施する業務を適切に重複させ、抜け、落ちの無いようにする必要がある。また、システムズエンジニアリングとして実施される業務の支援内容の定義も必要
- ② 制御系開発業務が分割契約される場合でも、1) 制御エンジニアリング管理業務、2) 要求分析及び要求事項の管理業務を担当する契約者が設定されることを前提とし、これらの業務を担当する契約者を制御系のサブシステム契約者とする。制御系のサブシステム契約者は設計、解析、製作・試験等の制御エンジニアリングプロセスに係わる業務を分割した場合でも、これら全ての業務に本標準が適用されることに責任を負うものとする。

付表 1 に人工衛星の姿勢制御系を例題に制御系に要求される信頼度要求及び技術成熟度により、制御系設計標準の適用指針を示す。

付表 1 信頼度要求及び技術成熟度による制御系設計標準の適用指針

信頼度レベル	成熟度 I	成熟度 II	成熟度 III
信頼度レベル I (典型的な例：実用衛星)	(1) 制御エンジニアリング管理： フェーズ 0 から基本的に全ての CE 管理を適用。 (2) 要求分析及び要求事項の管理： フェーズ 0 から基本的に全ての要求分析作業を適用。 (3) 制御系設計： フェーズ 0 からシステム設計、要素設計、実装運用設計全てを適用。具体的作業は姿勢制御系設計標準等による。 (4) 解析： フェーズ 0 から全ての解析業務を適用。ただし実績のある解析ツールを活用する場合はツールの検証等は省略化。 (5) 検証： フェーズ 0 からの検証を適用。	(1) 制御エンジニアリング管理： CE は改修部分をミッションに適合するための作業に適用。 (2) 要求分析及び要求事項の管理： 変更部分のみに限定可能。 (3) 制御系設計： 変更部分のみに限定可能。 (4) 解析： 変更部分のみに限定可能 (5) 検証： 開発フェーズは変更部分のみに限定可能。	フェーズ A, B の作業を適用除外可。
信頼度レベル II (典型的な例：技術試験衛星)	基本的に信頼度レベル I と同等ただし以下の作業は信頼度要求等に従い緩和可能 (1) 制御エンジニアリング管理： 信頼度要求により緩和。 (2) 要求分析及び要求事項の管理： 冗長、FDIR 要求等は緩和可能。 (3) 制御系設計： システムの複雑度、信頼度要求により省略。 (4) 解析： システムの複雑度、信頼度要求により省略。 (5) 検証： システムの複雑度、信頼度要求により省略。	(1) 制御エンジニアリング管理： CE は改修部分をミッションに適合するための作業に適用。 (2) 要求分析及び要求事項の管理： 変更部分のみに限定可能。 (3) 制御系設計： 変更部分のみに限定可能 (4) 解析： 変更部分のみに限定可能。 (5) 検証： 開発フェーズは変更部分のみに限定可能。	フェーズ A, B の作業を適用除外可。
信頼度レベル III (典型的な例：短期ミッション低コスト技術試験衛星)	基本的に信頼度レベル I と同等ただし以下の作業は信頼度要求等に従い緩和可能 (1) 制御エンジニアリング管理： 信頼度要求により緩和。 (2) 要求分析及び要求事項の管理： 冗長、FDIR 要求等は緩和可能。 (3) 制御系設計： システムの複雑度、信頼度要求により省略。 (4) 解析： システムの複雑度、信頼度要求により省略。 (5) 検証： システムの複雑度、信頼度要求により省略。	CE は改修部分をミッションに適合するための作業に適用。	フェーズ A, B の作業を適用除外可。
信頼度レベル IV (典型的な例：低コスト技術開発衛星、アマチュア衛星)	必要な部分のみを姿勢制御系設計標準等による。書類は省略可。	CE 管理業務は適用除外。	CE 管理業務は適用除外。