

ミッション創出に向けた システムズエンジニアリング入門

上野 宗孝

神戸大学・理学研究科
惑星科学研究センター

Systems Engineering とは



“The objective of systems engineering is to see to it that the system is designed, built, and operated so that it accomplishes its purpose in the most cost-effective way possible, considering performance, cost, schedule and risk.”

NASA Systems Engineering Handbook SP6105

Systems Engineering



- Systems engineering is a methodical, disciplined approach for the design, realization, technical management, operations, and retirement of a system.
 - A “system” is a collection of different elements that together produce results not obtainable by the elements alone.
 - Elements can include people, hardware, software, facilities, policies and documents.
 - All things required to produce system level results.
 - Systems engineering is the art and science of developing an operable system capable of meeting requirements within imposed constraints.
 - Not dominated by the perspective of a single discipline.
 - The responsibility of engineers, scientists, and managers working together

システムズエンジニアリング

プロジェクト(ミッション)の開発を行うに際し、システムズエンジニアリング(SE)とプロジェクトマネジメント(PM)は合わせて語られることが多い。これらは開発のフェイズに従い、その位置づけと重みが変わるものである。

しかし、いずれについても、そこに書かれている内容は、『当たり前的事实・やり方』の積み重ねである。この意味では、全ての仕事は、当たり前のことが当たり前になれば、それが全てと言って良い。しかしながら、人間(チーム)が実行するに当たっては、一般的にそれは最も困難なことなのである。例えば、塩野七生さんが多くの著書に書かれているが、『人間は、自分の見たいものだけを見る』と言うのは真実であり、プロジェクト当事者は非常に高い確率で、当たり前のやり方を見失うものである(そういう事を多く見てきた)。また、プロジェクトに関わる全ての人々が、プロジェクト開発のやり方を熟知しているところから始めることも不可能である。

このような背景において、その一助となるものとして、SE/PM の考え方が導入されているのである。

システムズエンジニアリング

システムとは、ある目的を達成するために組織化された機能要素の集合であり、組織化により単なる要素和以上の特性を発揮するものと定義される。システムズエンジニアリング(以下SE)は、このようなシステムの目的(ミッション要求)を実現するための工学的的方法論及び、その一連の活動である。

システム開発の過程は、幾つかのステップを踏む。第一に、ミッション要求を明確に定義することが必要である。そして、そのミッション要求と制約条件から定められたシステムの機能を段階的に分割し^{*1}、分割された機能要素間の関係を詳細に検討する。また、分割された要素を統合して適切なシステムを作り上げていくとき、それぞれの設計が要求された機能を満足していることをチェックし、最終的には、システムの中に組み込まれた運用状態の試験で検証することが求められる。この一連の活動を示したのがVカーブである。全体を分割と統合に大別し、V字型に折り曲げることで、同じ階層におけるアウトプット(成果物)間の検証や上位要求に対する妥当性確認を行うといった関係を表している。

***1)このような考えの根底に要素還元主義的なものの見方がある。すなわち、物事は様々な要素から成り立っており、小さな構成要素に分けその仕組みを一つ一つ解明していくことにより物事の仕組みが分かるとする考え方である。**

From science into space mission

Systems engineering approach



- Mission design and systems engineering
- Project Planning
- Objectives – Requirements - Solutions
- Why do we need requirements?
- Properties of Requirements
- Trade-off
- Requirements & Design Drivers
- Mission Definition
- Mission Phases

From science into space mission

Systems engineering approach



- When you fix a mission design
 - ✱ Design of the spacecraft shall be feasible
 - ✱ to confirm the readiness of the mission
 - ◆ one needs conceptual design works including
 - ✓ mission operation
 - ✓ verification plan of the requirements of the mission
- Systems engineering must be very important in these early phases of mission designing



例えば

- ある日、所属研究室の教授が、
 - ✳ (教授) 『3月14日に送別会をやるから、幹事をやって下さい』
 - ✳ (私) 『どこでやるのが良いですか?』
 - ✳ (教授) 『今回はセミナー室でやろう、17時からにしておこう』
 - ✳ (私) 『予算は幾らくらいですか?』
 - ✳ (教授) 『そうだな教員からは5,000円集めて、卒業生以外の学生は2,000円位でいこう。私は、あまり食べないけど、美味しいワインは用意しておいてね』
 - ✳ (私) 『判りました』
 - ✳ . . .その後
 - ✳ (私) 『送別会の日が決まったけど、これこれの内容だった』
 - ✳ (同期A) 『俺は、ビール沢山飲みたいなー、それとK君も酒飲みだよね。』
 - ✳ (同期B) 『私は、飲めないから、美味しいものを買いたい、ケーキもね。』
 - ✳ (私) 『じゃあ、ちょっと考えとくね』

目的そして要求と境界条件の明確化

● 目的

- ✳ 充実した送別会を開催する

● 境界条件

- ✳ 3月14日17時から送別会を開催すること、会場はセミナー室
- ✳ 総予算は〇〇円

● 要求分析

- ✳ セミナー室を確保
- ✳ 美味しいワイン
- ✳ 多くのビール
- ✳ 食べ物
- ✳ お皿やコップ

● 要求の中身を細分化，ブレイクダウンし，優先度を付ける

● さらに，日程を見込んだ準備計画が必要

宇宙機の開発とシステムズエンジニアリング

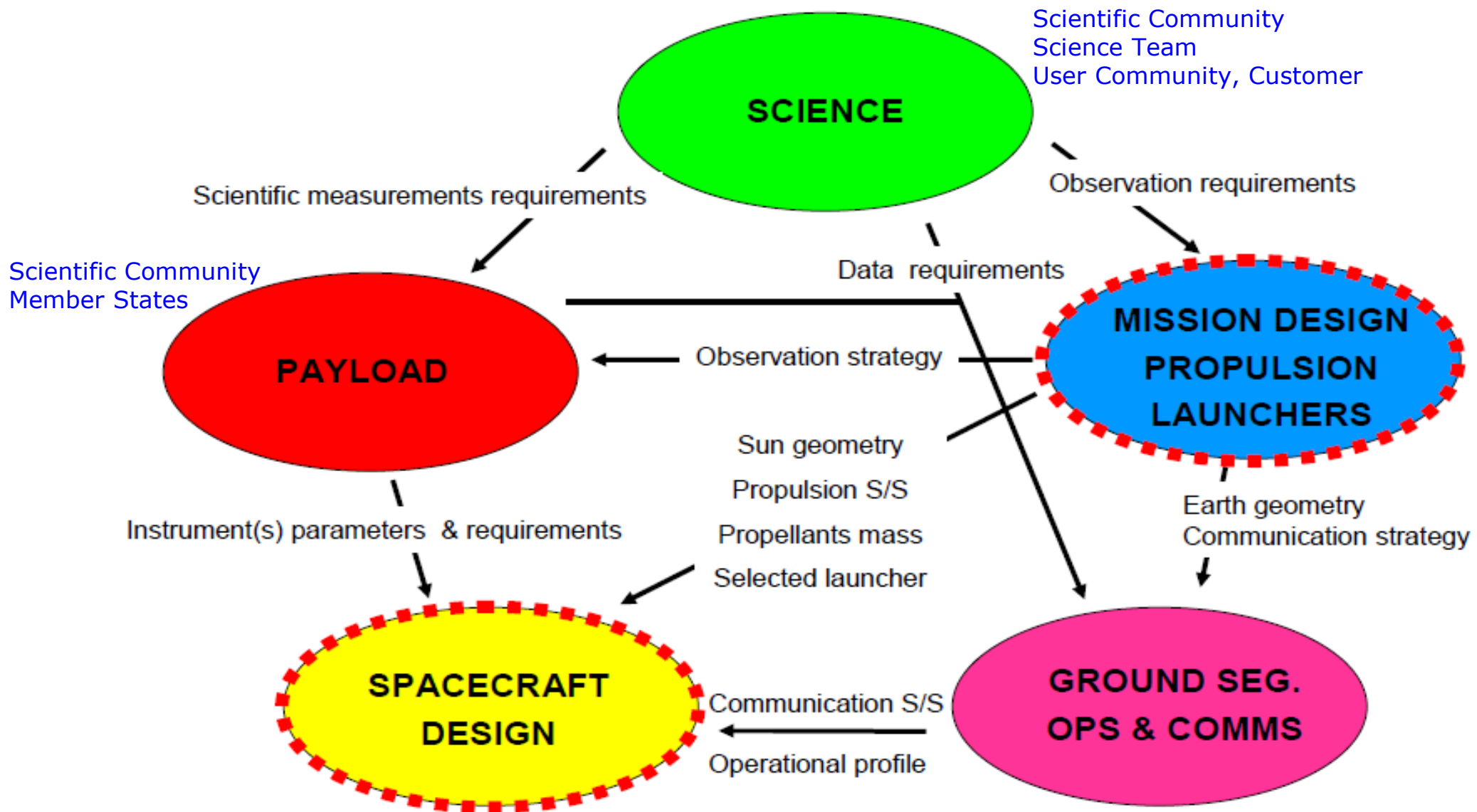
- 先の例の，送別会の範囲であれば，一人の頭の中で考え，予算のメモ位を準備すればできる(大きな規模になると無理だが).
 - ✱ 購入配分の計画 (資金管理計画)
 - ✱ お買い物リスト (調達品計画), 買い出し担当決め (人員計画)
 - ✱ リスク管理：食べ物・飲み物が足りない場合の心積もり，事後交渉
 - ✱ これは，規模は違うが，地上の望遠鏡の開発でも同じ枠組み
- 宇宙機の開発では
 - ✱ 一般的に宇宙機のシステムは，極めて複雑なシステムである.
 - ✱ 境界条件が非常に厳しい (予算，スケジュール，打上条件)
 - ✱ 多くの専門家のチームプレイとなる
 - ◆ 目的・意識・内容の共有が重要となる(これはプロジェクトマネジメントに関わる内容ですが，それが出来るような準備立ては，システムズエンジニアリング)
 - ✱ 打ち上げ後は，修理や改造はおろか，大規模な調整が出来ない.
 - ✱ 事前(打ち上げ前) に検証可能な設計，手法が必要

システムズエンジニアリング

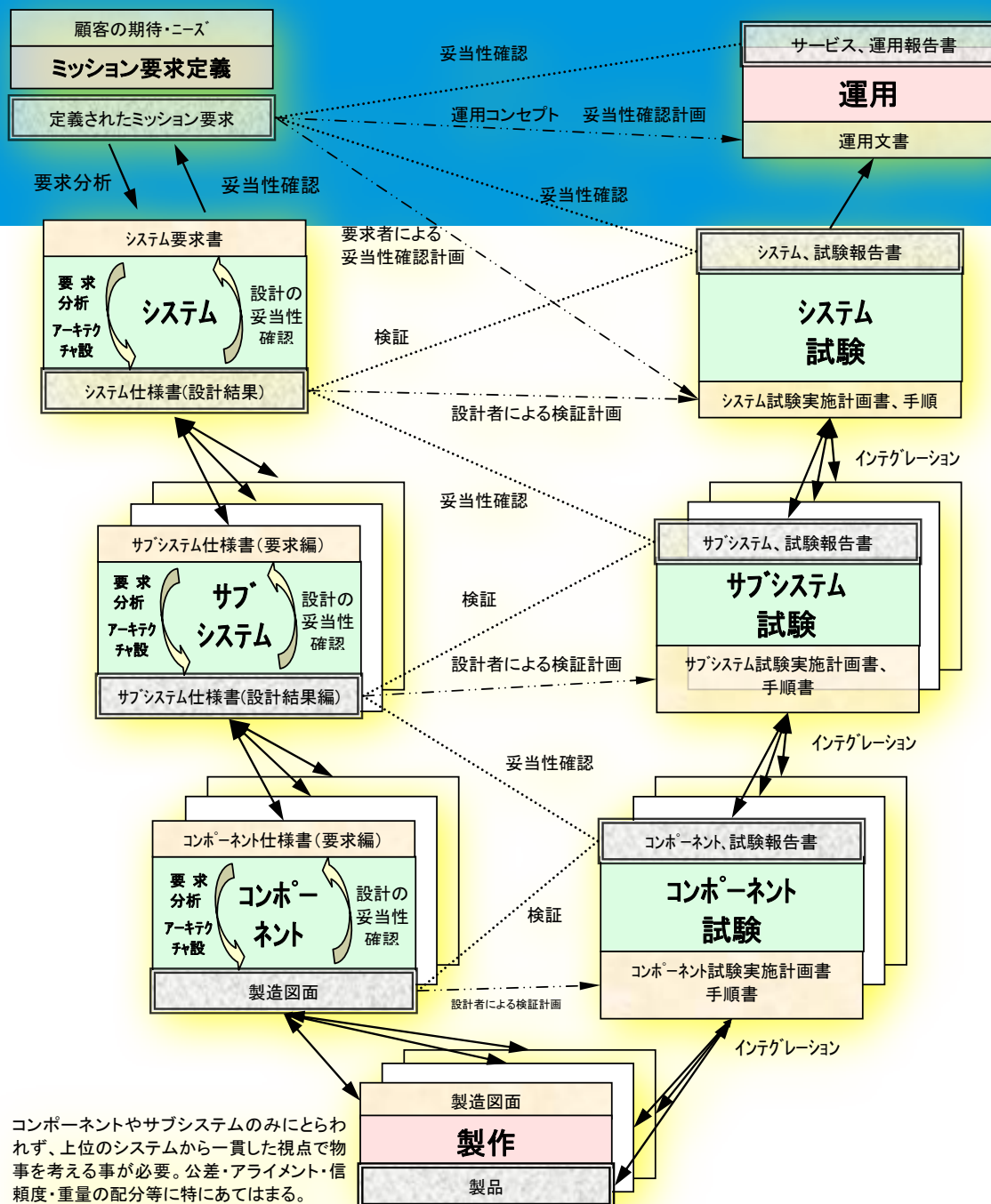
🏆 最も重要なこと

- ✳ システムズエンジニアリングアプローチにおいて重要なことは、各段階(プロジェクトでは、フェイズ(Project Phase)と呼ぶ)における要求の明確化である
- ✳ (この重要性は、何事においても同じことである(特に実験では))
- ✳ 各段階の『要求(requirements)』の明確化
- ✳ 境界条件(Boundary conditions)の明確化：多くの場合、外的な要因による
- ✳ 要求には、相反するものが併存する場合が多い。
- ✳ 境界条件の範囲で、要求の全てを満たせないのが普通である。
- ✳ このため、要求には、必ず『優先順位』を付ける必要がある。
 - ◆ 目的に対して『絶対譲れない要求』『非常に高い要求』『できれば』に整理
- ✳ どの要求が、次のフェイズの、どの要求につながっているかを明確にしておく(システムズエンジニアリングでは、Traceability という)
 - ◆ 要求の取捨選択(Trade-off study と呼ぶ)の記録も明確にしておく
- ✳ 検討を進めて行くと、検討したシステムが境界条件に入らないことが多い。
 - ◆ しばしば、フェイズを遡って、要求の調整を行うことが必要になる。

Mission design



システム開発のVチャート



コンポーネントやサブシステムのみにとらわれず、上位のシステムから一貫した視点で物事を考える事が必要。公差・アライメント・信頼度・重量の配分等に特にあてはまる。システム・サブシステムなどの各階層において同様なプロセスが繰り返し実施されるが、必要に応じて上位の階層にも立ち戻る。

システムズエンジニアリング (SE)

システム開発の中では、システムレベル、サブシステムレベル、コンポーネントレベルで同じようなプロセスが繰り返される。個々の開発プロセスには普遍性があり、個々に分類することがSEの方法論である。この分類により個々のSEプロセスをきちんと意識して実践することが容易になるが、それぞれは独立でない。それらを有機的に結合させること、すなわち、全体を見渡すというシステム思考のもとでSEプロセスを実践することがSEの肝である。

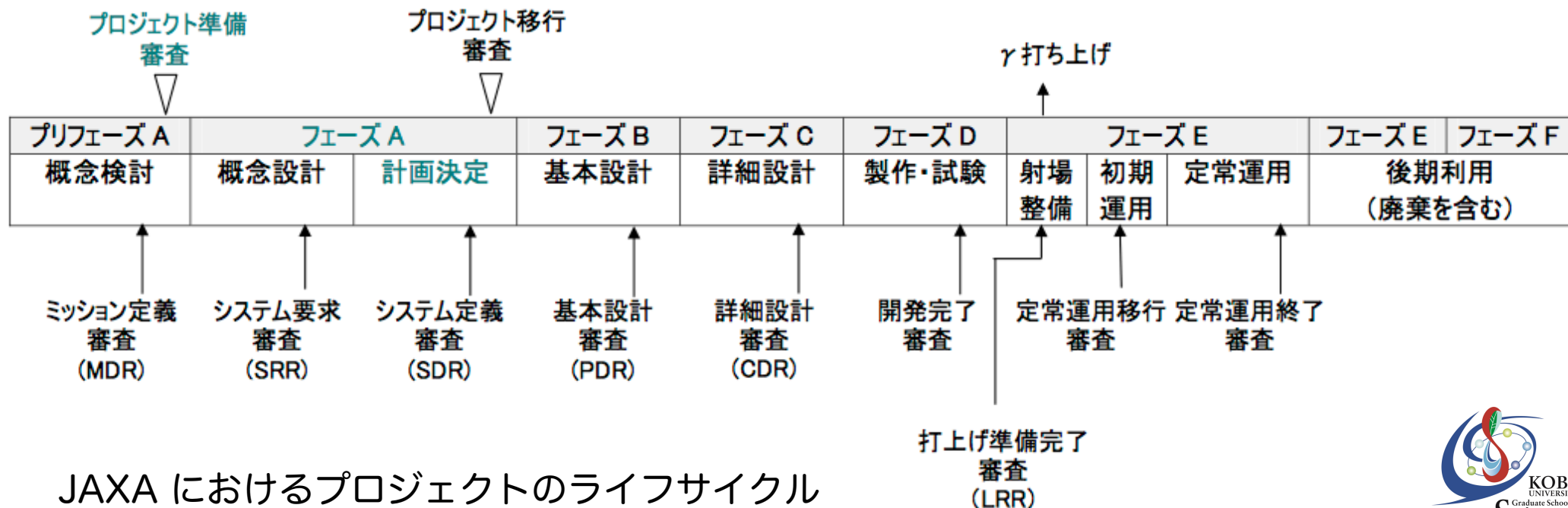
更に重要なことは、Vカーブの全体を常に見通して一貫した開発計画を立てること、そしてそこに内在するリスクを識別し、できる限りの低減策を講じることである。実際のシステム開発においては、定められた制約条件の中で品質・コスト・スケジュール(QCD: Quality, Cost, Delivery) をバランスよく満たすこと、すなわち、Best Compromise*2が求められる。開発の初期段階から、最終的なアウトプットと全ライフサイクルを見通しつつ、QCDのバランスとマージンを考えることが大切である。

***2) Best Compromiseとは「良い意味での妥協」であり、リスクの存在を容認することも含まれる。**

但し、必要以上に何かの機能のベターを求めることにより生じるリスクはQCDのバランスを欠く可能性があり、厳に避けなければいけない。

段階的プロジェクト計画法におけるSE活動

宇宙機などの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ぶ。



段階的プロジェクト計画法におけるSE活動

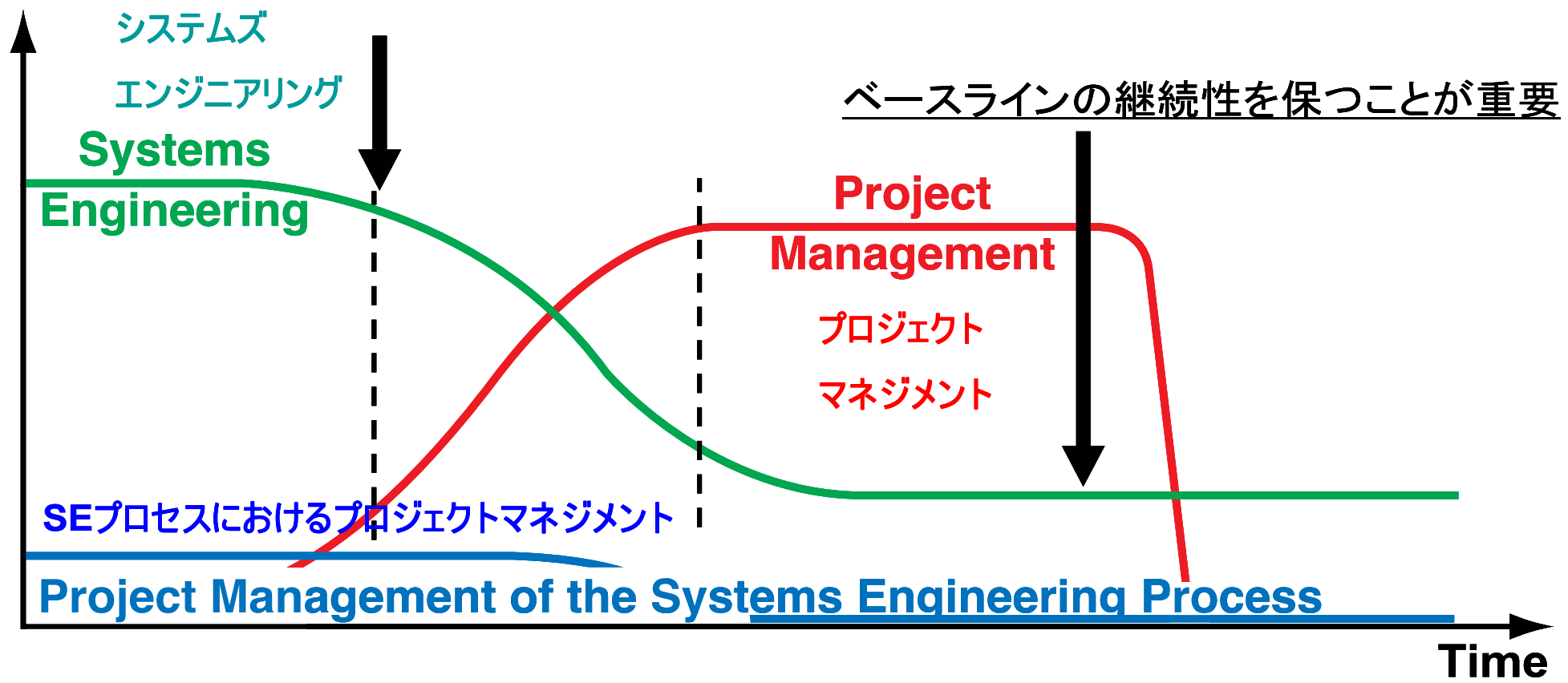


ミッション要求を決める際には、システムの実現性の見込みがなければいけない。そのためには、運用コンセプトや要求の検証可能性も含めて、ある程度のシステム設計(概念検討・概念設計)が必要であり、システムの実現性を見込みを得るためにはサブシステム・コンポーネントの検討も必要である。理想的に言えば、フロントローディングとして、これらがきちんとできておれば、その後はプロジェクト管理として計画通りに製作・調達の管理とインテグレーション・試験をしていけばいいということになる。すなわち、SE活動の重要性は早期段階におけるシステム設計にある。

しかしながら、現実には開発の中盤以降においても大小さまざまな不具合が発生することは避けられない。その際には、要求のトレーサビリティを確保する等のSEの考えに則った対処がミッションサクセスにとって重要である。(要するに、ミッションの要求に照らした上での良い意味の妥協、そしてリスクのトレードオフも重要なSE/PM活動である。)

プロジェクトにおけるライフサイクル・作業量

初期段階からアウトプットを意識した「システム思考」と「リスクの識別」を実践



概念検討／概念設計 | 計画決定 | 基本設計 | 詳細設計 | 製作・試験 | 打上げ・運用 | 廃棄

プリフェーズA / フェーズA | フェーズB | フェーズC | フェーズD | フェーズE | フェーズF

システムズエンジニアリング

ミッションを実現するシステムを品質・コスト・スケジュールのバランスをとりながら開発するために、これまでも各エンジニアは様々な注意を払いながら、必要な機能の取込み、無駄な機能の排除、不具合や手戻りの抑制・排除を試みてきた。

SEプロセスのほとんどは、これまでのプロジェクト活動等の中で経験豊富なエンジニアの発想に基づいて既に行われてきたものであるが、これらをベストプラクティスとして体系化を図ることにより、適切なシステムを効率的(コスト, スケジュール)に実現することを目的としている。

システムズエンジニアリングにおける 重要なポイント(特に宇宙開発分野において)



- (1) **【要求の明確化】** : システムは、いうまでもなく、特定のミッション要求を達成するためのものである。ステークホルダ(顧客)の要求は必ずしも工学的な言葉で表現されとは限らないが、彼らの期待・ニーズを徹底的に(潜在的な要求も含めて)引き出し、分析して工学的要求として明確化することが重要である。さらに、それを顧客・ステークホルダに確認することで、要求の齟齬による手戻りを防ぐ。
- (2) **【コスト・スケジュール・品質・リスクのバランスの確保】** : 意思決定に対し、客観的な判断基準をもってコスト・スケジュール・品質(以下QCD)をトレードオフして結果を示すことにより、バランスの良いシステムを構築する。また、システム全体を見渡して潜在的問題を早期に抽出しリスクの低減化を図ることで、QCDのバランスを崩す要因を未然に防ぐ。
- (3) **【技術活動の明確化】** : 全ライフサイクルにおける技術活動をあらかじめ一貫して計画し、それらの繋がりを示すことにより、現時点での技術活動の内容・目標が一層明確になるとともに、システム全体として整合性のある技術活動を行う。また、後続の活動を視野に入れて現時点の技術活動を行うことで、見通しのきいた成果を出す。

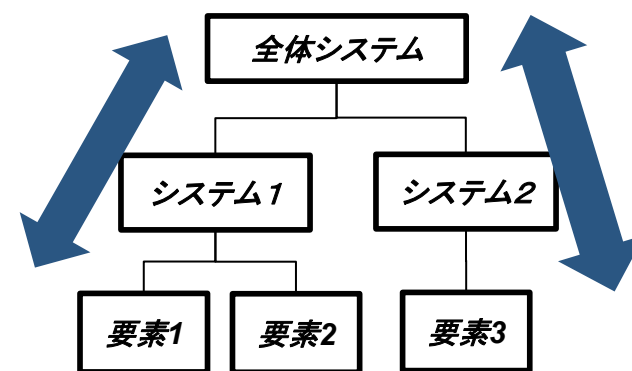
システムズエンジニアリングにおける 重要なポイント(特に宇宙開発分野において)

- ・(4) **【経験の活用】**：開発プロジェクトなどで得られたベストプラクティスを体系化，フィードバックすることにより先人の知識・経験・技術を継承する．これらの教訓 (レッスンズラーンド: Lessons Learned) を充実していくことにより，例えば，開発プロジェクトを担当する技術者に対する教育効果が期待でき，またチェックリストの役割を担うことで見落としの防止を図るとともに，開発の効率化を図ることができる．
- ・SEはミッションサクセスにとって必要条件であるが，十分条件ではない．高い専門技術力・洞察力と合わせることがミッションサクセスに不可欠である．
- ・SEはシステムエンジニアが実践すれば良いと考えられがちであるが，システムエンジニアにだけ理解されいてもうまくはいかない．サブシステムのエンジニアにとっては，サブシステムがシステムにあたりSEの考え方が必要とされる．また，契約や法律等の他の関係者もSEの理念や基本的考え方を理解することが，円滑で調和の取れた作業につながる．
- ・オーケストラで例えれば，指揮者はプロジェクトマネージャ，コンサートマスターはシステムエンジニア，楽団員はSEを学びSEの素養を持っている技術者と言える．指揮者やコンサートマスターが全体を見渡しリードする振る舞いを行っても，楽団員にそれに調和していく意識がなければオーケストラとして纏まらない．サクセスに不可欠である．

システムズエンジニアリングと 要求の明確化に向けた活動

- システムズエンジニアリングは決して「トップダウンアプローチ」ではない
- 抽象度の高い上流における検討・最適化の反復が必要
- 具体例は必要：無いと抽象度の高い概念は把握しづらい、但しあくまで例
上流における創造的活動が、より大きな価値を生み出す

- いきなり要素レベル(例：自分のミッションセンサ)の議論に執着しない
- 実現可能かつ価値がある要求・設計・検証・運用を定義することで手戻りを最小化 (トップダウン的)
- 下流で構成要素を具体化した後に、再度上流に戻って要求やインタフェースを最適化する、というように、**意図して抽象度のレイヤーを往復**しながら検討・最適化を反復し、より確実な開発を実現する。
- 再利用する場合には、製造図面や解析のレベルではなく、要求レベルや、機能・運用レベルでも再利用が可能になるよう意識する → **要求・機能・運用も文書化**



機能：推進力を路面との接触により発生する



OR



要求を満たすことを確認できること

- **検証・妥当性確認**：要求やリスクマネジメントとセット、コストとスケジュールに大きな影響
- **Verification(検証)**
 - **Do the things right**：要求に対して製品が正しくできたか
 - 4つの検証手法：解析, 試験, 検査, 類似性
 - ◆ 試験が最良だが、スケジュール・コスト・リスクとトレードオフ
 - 検証によって品質が向上することは無い(品質の確認のみ)
 - ◆ **全てのリスクが許容できるのであれば、検証は不要**
 - ◆ どの段階でどのリスクを低減したいかで、検証計画が決まる
 - **Fly as you Test, Test as you Fly ← 運用と検証はセット**
- **Validation (妥当性確認)**
 - **Do the right thing**：ステークホルダーにとって正しいか、ニーズを充足するか
 - **メーカーにとって正しく製造した製品が、必ずしもステークホルダーのニーズを充足するわけではない (モノづくりの本質)**
 - 妥当性確認手法は様々：レビュー、プロトタイプ、デモ

ミッション要求の定義

- ・ミッション要求定義は、ミッションの基本的な要求を取りまとめるプロセスであり、以降のSEプロセスの原点(ベースライン)となるものである。システムの開発に際しては、『誰のために(顧客)、何のために、いつまでに、どのような製品・成果物を提供するのか』が明確でなければいけないのは当然であるが、単にそれだけでなく、関連する全てのステークホルダの意見、期待、ニーズも併せて整合性がなければいけない。
- ・顧客は誰であるかを正しく認識する必要があるが、ステークホルダ(顧客)が最初から明確とは限らない。例えば、実用衛星の場合は、社会的ニーズや政策的要求のために開発して運用することを目的とするが、最終的にステークホルダ(顧客)を代表することになる機関や業界との間に、最初時点ではミッションの意義・目的の共通認識がない場合がある。正しい顧客・ステークホルダの識別とその真意の正確な把握が重要であり、システム開発の担い手との間で相互に正しい認識を持つことが出発点である。この点、科学衛星・科学探査の場合は明確である。顧客はミッション成果に直結する当該分野の科学者・コミュニティーであり、彼らの期待・ニーズを取りまとめる者は(プロジェクト化した暁には)プロジェクトサイエンティストとなるべき人である。

ミッション要求定義

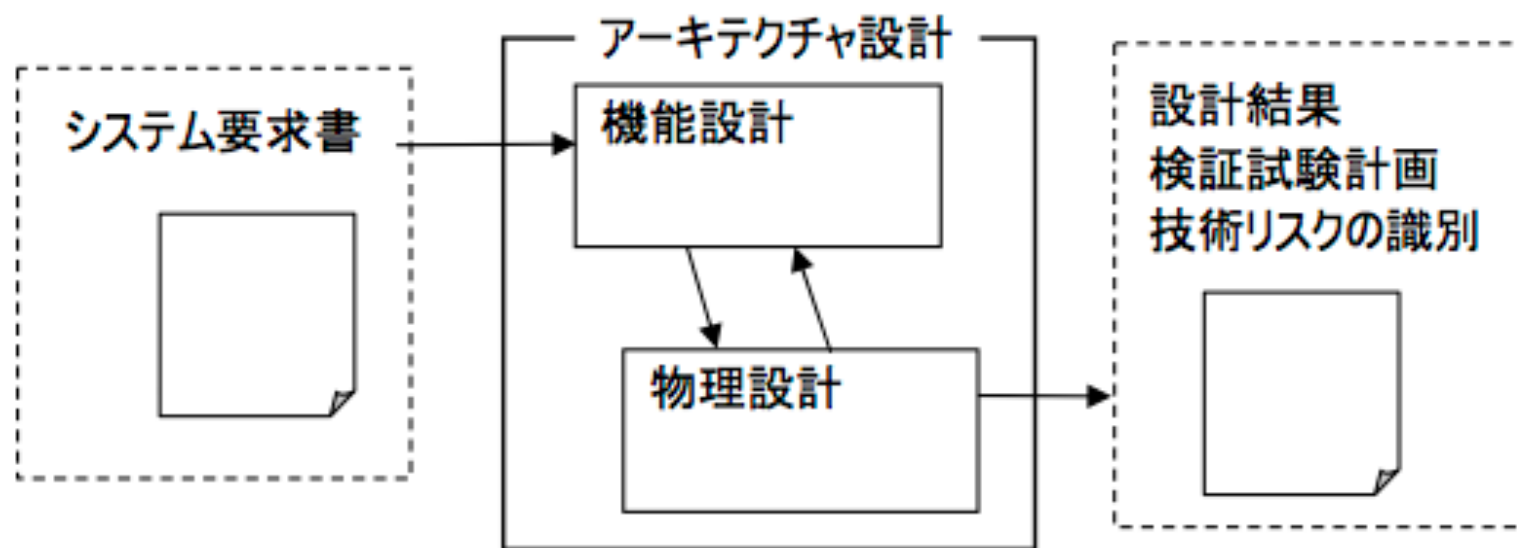
- ミッション要求をまとめるに際しては、ステークホルダ(顧客)の期待・ニーズを自己矛盾のない工学的・技術的要求に関連付け、しかも、リソースやスケジュール、その他の種々の制約条件の下で実現性の見込みをもつ必要がある。彼らの期待・ニーズは当初必ずしも実現可能なものとは限らないので、システム開発を担うJAXAと顧客・ステークホルダの間のコミュニケーション(協議)が繰り返し行われる。最後にまとめられたミッション要求は、顧客・ステークホルダとの妥協も含めて、相互に調整、合意の結果でなければいけない (Best Compromise).
- ミッション要求のとりまとめを行う者は必ずしも(狭義の)システムズエンジニアではない。例えば、科学衛星の場合はプロジェクトサイエンティストとなるべき人であり、利用衛星の場合は宇宙利用を統括する組織がこれを担う必要がある。いずれにしても、ミッション要求定義プロセスのアウトプットはプロジェクト化した後に継続性を確保することが重要であり、将来そのプロジェクトの中核を担う人が深く関わることを望ましい。

ミッション要求定義

- ・顧客・ステークホルダの期待・ニーズは必ずしも工学的な言葉で表現されるとは限らないし、潜在的な期待・ニーズをも引き出すことが大切である。そのような期待・ニーズを網羅的に分析し、重要度の重み付けと実現方法と紐付けをするための手法のひとつとして、品質機能展開(QFD)がある。QFDにおいては品質表を作成するが、その縦軸に顧客の期待・ニーズを、横軸にそれを実現するための方法を示し、その交点に関連度の重み付けを行う。これにより、要求の抜け防止を図ると共に、システム設計等におけるトレードオフやリスク管理などに資する。
- ・ミッション要求と工学的要求の関連付けや実現性の目処を得るには、次の段階であるシステム要求分析を待つ必要があるが、要求を取りまとめる中間段階でも、幾つかのオプションの概念的なトレード解析により見通しを立てる必要がある。また、更に深い検討、アーキテクチャ設計が必要な場合もあり、その要否と検討の深さに対する的確な判断が必要である。これらの活動にあたっては豊富な経験と洞察力が要求される。

アーキテクチャ設計について

- ・アーキテクチャ設計とは、システムに要求されている機能・性能を満足する解を作ることである。具体的には、その機能・性能をシステムの構成要素に配分して、構成要素の仕様と構成要素間のインターフェースを明確にするとともに、検証試験計画と結果の妥当性判定基準を作成する。また、アーキテクチャ設計の段階で技術リスクの識別と低減策を検討しておくことが重要である。
- ・アーキテクチャ設計は、後述する機能設計と物理設計からなる。それぞれは同時並行で行われ、コスト、性能、技術的リスク等も含め適切な結果を得るための設計作業やトレードオフが繰返し行われる。この際、システム要求にまで遡り見直しを行う必要がある場合もあるが、そのとき、更に上位の要求からのトレーサビリティに留意する。



アーキテクチャ設計について

- 宇宙システムのような、大規模でリソースが極限まで制限されたシステムでは、個々の分散した要素に割り付けられた機能だけでなく、システムとして組み上げられて初めて新たな機能 (例: 分散処理や機能冗長など) を発揮するなど、システム全体のアーキテクチャを考慮した設計が必要とされる。
- Vカーブの大きなフレームワークの中ではアーキテクチャ設計のアウトプットが製造設計への入力となる。但し、ここで示されている基本的な考え方は下位の詳細設計でも同様で、その意味で、下位レベルでも再帰的に行われる。
- 本プロセスの副産物には、製作・統合プロセス群に必要な治工具や試験装置の製作/調達計画も含まれている必要がある。
- サブシステムレベル以下の具体的な設計はそれぞれの専門グループ(または契約相手先)に委ねられるが、システムズエンジニアも一緒に検討する必要がある。SEの主たる役割は、全体的見地からの機能配分、システムとサブシステム、サブシステムとコンポーネントといったレベル間での要求と物理設計結果のトレーサビリティ、及び、インタフェースについて齟齬がないかチェックを行うとともに、検証試験計画やリスク識別・低減策の妥当性をチェックすることである。

システムズエンジニアリングとは

- ここまでの話を概括すると、システムズエンジニアリングとは、要求を満たすシステムを、限られた境界条件を前提として成立させるための方法論を、経験論に基づきフォーマライズしたものであると言える。
- 要求そのものは、『ミッションの最終目標を満たす』こととなり、一般的に多様な要素を含むものである。
- 境界条件は一般的に、スケジュール、コスト(資金)、打ち上げ条件(重量・環境条件)、人的リソース、技術的状况、社会的状況 などである。
- そして、宇宙開発に関わらず、優秀な実験屋(特に物理実験屋)は自然に身に付けていることかもしれない(もちろん極めて稀にしか居ないが)。
- 宇宙開発に関わる部分は、この手順が重要である。それは、他分野と比較して境界条件が一般的に厳しく、またシステムの複雑さの規模も大きい。さらに言うと、打ち上げ後の物理的な補給や改修・修理が困難であるため、他分野と比較してシステム検討に対する要求への整合性や信頼性(堅牢さ)が強く求められるためである。

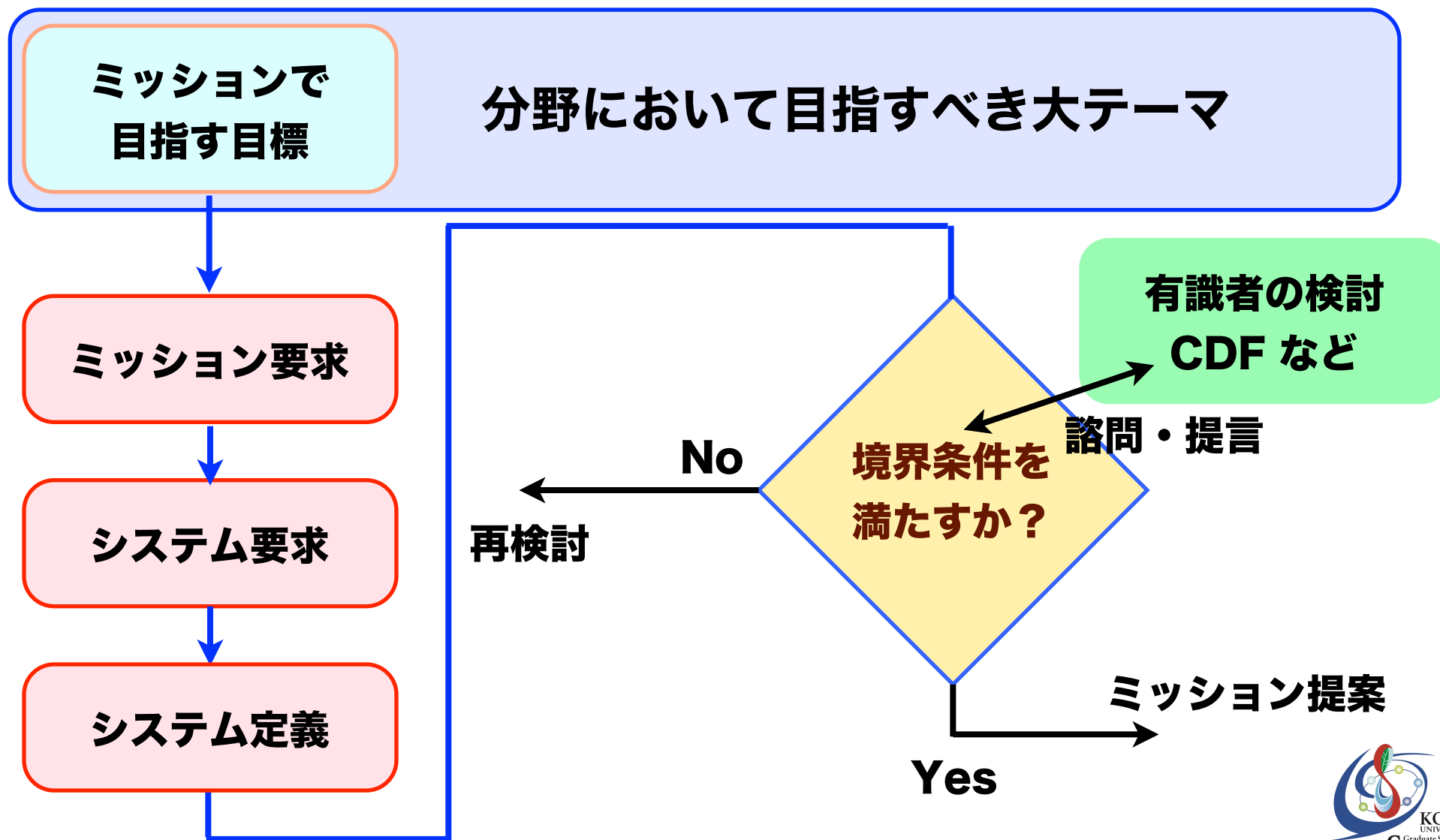
ミッション要求からシステム要求へ

- 例えば, ある科学目標があるとする
- 上記を実現するためのアプローチは, 一般的に多様である. この中から最適なアプローチを決定するのが, ミッション要求/ミッション定義の策定である. 科学ミッションの場合, どのような情報を取得したいかを確定する作業である.
- システム要求とは, どのような量をどのように測りたいかを定める作業であるが, あるミッション定義を満たすための測定は, 一般的には極めて多様な選択肢を持つはずである.
- システム定義とは, その測定を行うための方法・手段を確定する作業である.
- 科学探査の場合は, ここまでの作業が最も重要であり, かつシステムズエンジニアリングが, 活用されるべきフェイズである. ある科学目的に対して, それを満たすシステム定義は, 一般的に (上記の多様性) \times (上記の多様性) \rightarrow ほとんど無数のアプローチの中から, 最適(に近い)一つを選ぶ作業である. 従って, 何か一つの解を見つければ良いのではなく, 最適に近い一つを探し出す必要がある.
- (このため, この過程においては審査と言うプロセスでは無謬性が担保でき無い.)

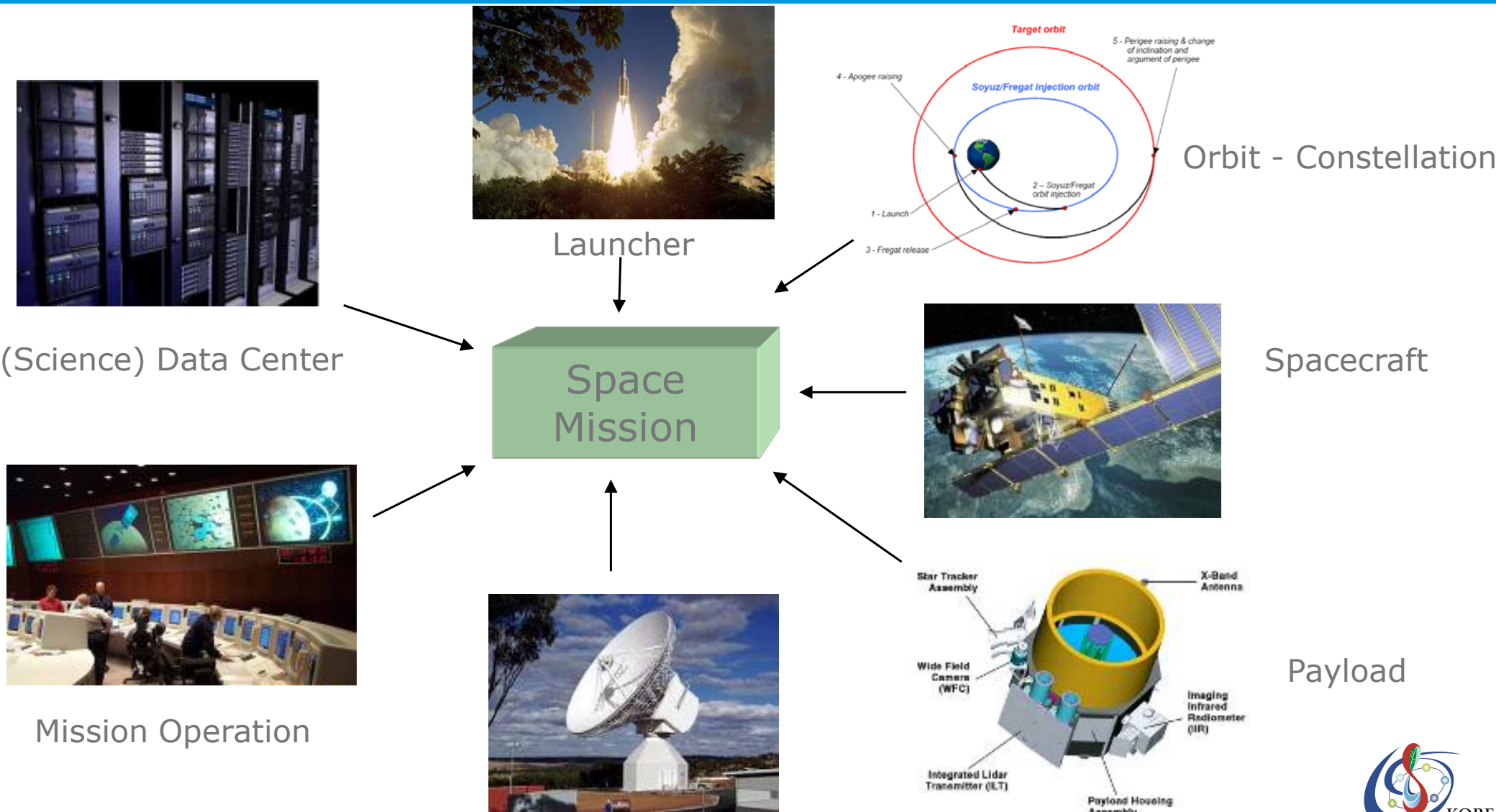
ミッション要求/システム要求

- ・しかしながら、そこで到達したシステム定義は、境界条件の中で達成可能なものである必要がある。このため、最適と思われる解を探るためには、ミッション要求からシステム定義までのサイクルを循環的に検討する(イテレーション)作業が、一般的に必要となる。
- ・上記の見極めに関して、個々の技術要素に限らず、システムの規模、必要なスケジュール、資金を見積もることは、一般的に容易では無い検討である(宇宙開発に関わる経験者の中に、稀に見極める力を持つ方もおられる)。
- ・上記の検討には、 Concurrent Design Process が有用となりうる。ESA などでは、この部分を担保するために、 Concurrent Design Facility と呼ばれる常設の部隊を設置している。
- ・多くの失敗するアプローチは、以下。
 - ・自分は、こんなに優れた測定技術を持っている。これを使えば良いミッションが出来るはずだ。・・・若しくは、過去にこんなにうまく行った手法がある。この手法は世界で今でもやられていない。・・・と言うところからスタートするミッション。何故か？

ミッションの目的に対する要求の最適化



Elements of Space missions



(Science) Data Center

Launcher

Orbit - Constellation

Spacecraft

Space Mission

Payload

Mission Operation

宇宙機のシステム要素

ミッション系		衛星に対するミッションに固有、複数搭載も有 (望遠鏡、磁気センサ、アンテナ、、、) 通信・電源・構造・熱制御を独自に実施する一つのシステムとして構築される場合もあり
バス系	データ処理	衛星内部のデータハンドリングを行う。ミッションデータ・HKデータを処理し、一時的に蓄積し、地上に送信する。コマンドを解釈し、必要な機器に配信する。
	電源	日照時に太陽電池パドルからの電力を各機器に提供するとともにバッテリーに蓄積する。日陰時にバッテリーから各機器に電力を提供する。
	姿勢軌道制御	衛星の姿勢や軌道を計測し、制御すべき量を算出し、制御を実施する。
	通信	地上からの指令(コマンド)や衛星の状態を示すデータ(テレメトリ)を地上とやりとりする。
	推進系	姿勢・軌道制御のための外力(推力)を発生する
	熱制御系	衛星各部の温度をそれぞれ必要な温度に保持する。
	構造系	衛星全体を外部荷重等に対して構造的に保持する。機器等を実装する場所を提供する。歪を所定以下に制限する。
計装系	ワイヤハーネス等により電氣的に各機器や衛星外部を接続する。ブラケット等により機械的に各機器を所定のとおりに保持する。	

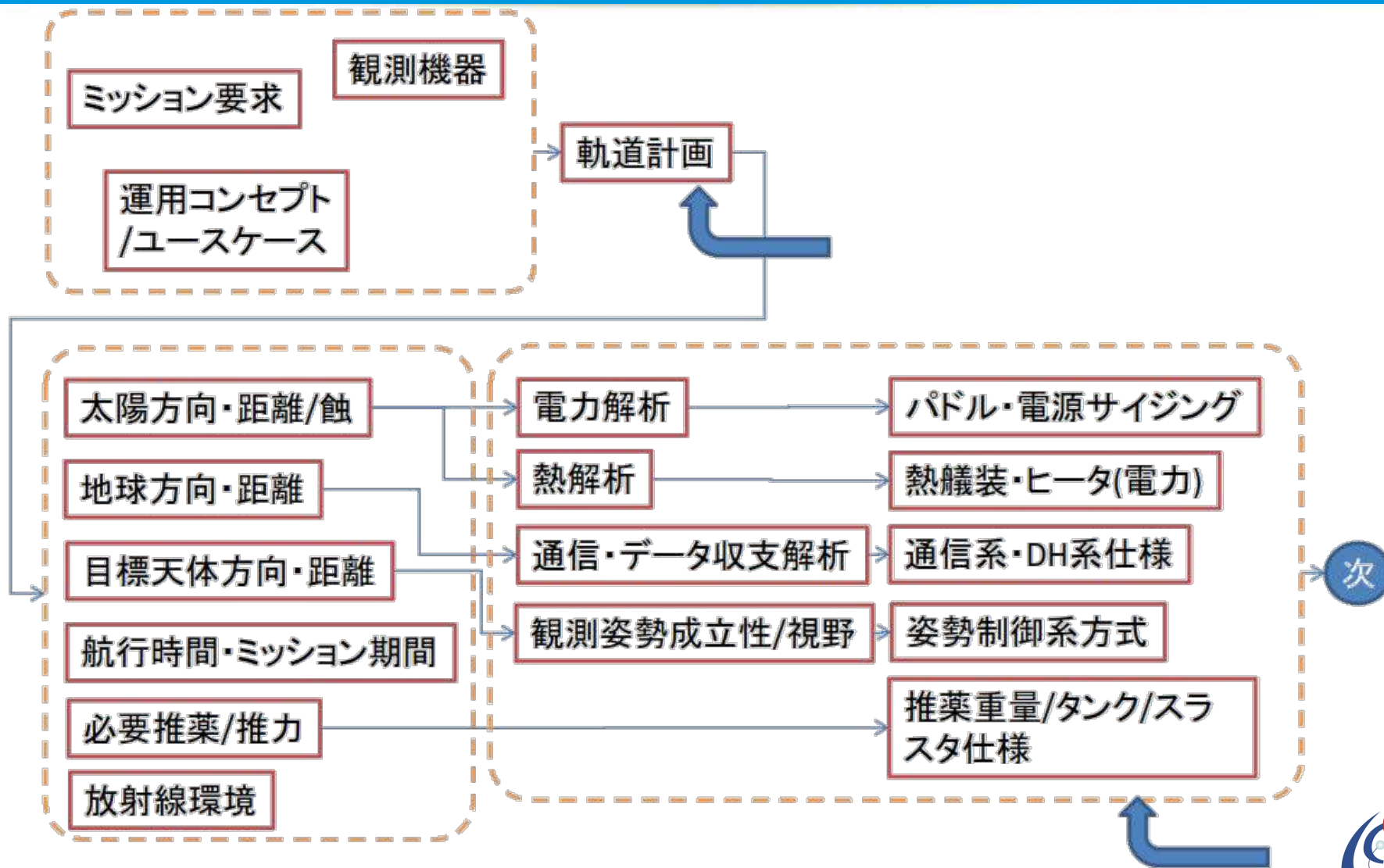
探査機には何が必要？

- 地球との通信
 - ✳ 通信機, アンテナ
- 推進系(通常は科学燃料による噴射)
 - ✳ 燃料タンク, スラスタ(噴出器)
- 姿勢維持
 - ✳ 姿勢検出
 - ◆ 太陽, 天体, 慣性誘導装置
 - ✳ 姿勢制御
 - ◆ モーメントム/リアクション・ホイール, 推進系
- 温度維持
 - ✳ 放熱(通常は放射冷却), ヒーターによる昇温制御
- 電力
 - ✳ 太陽電池, 原子力電池, 将来は超小型原子炉?

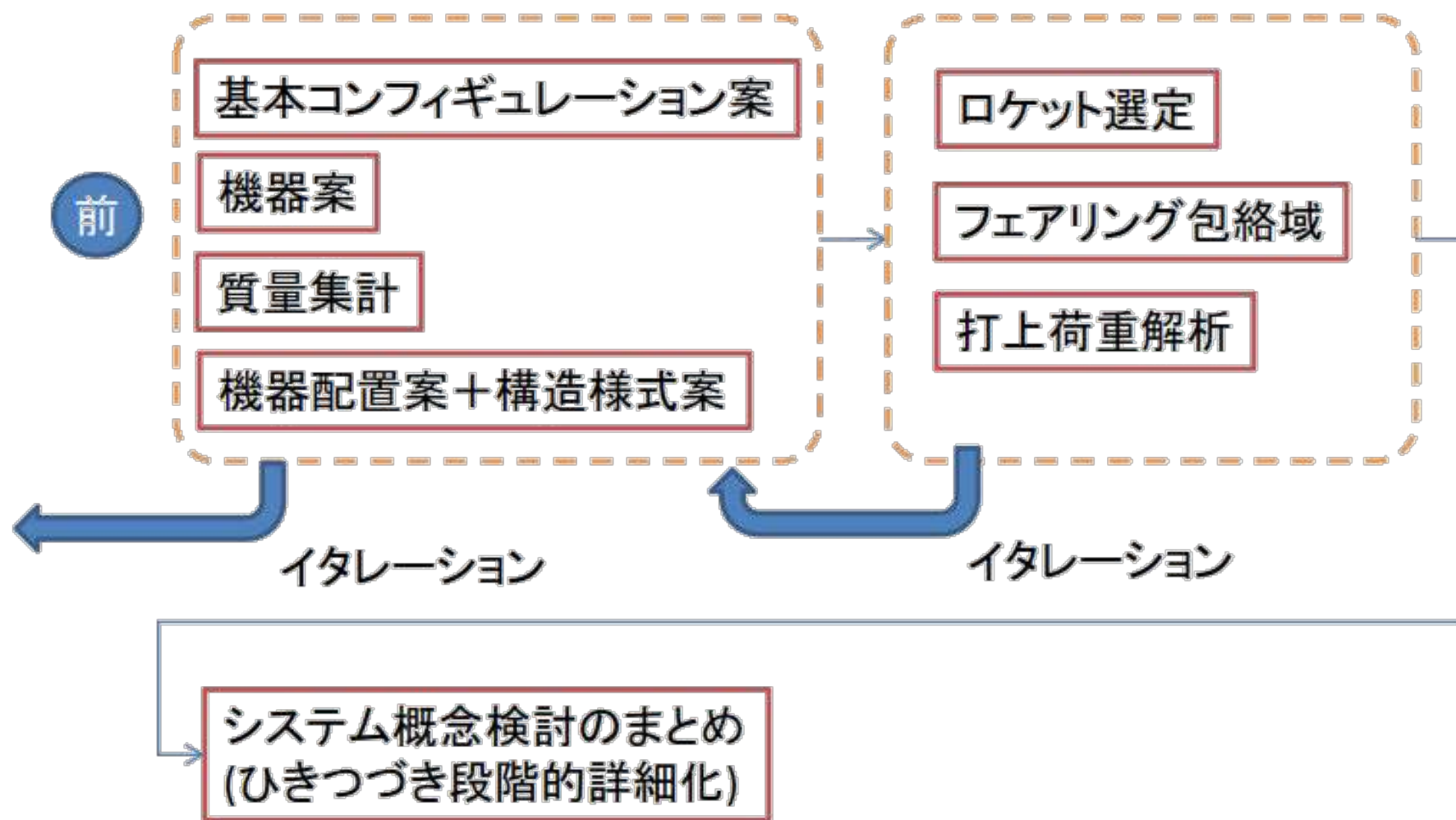


500 N engine

システムの概念を設計する



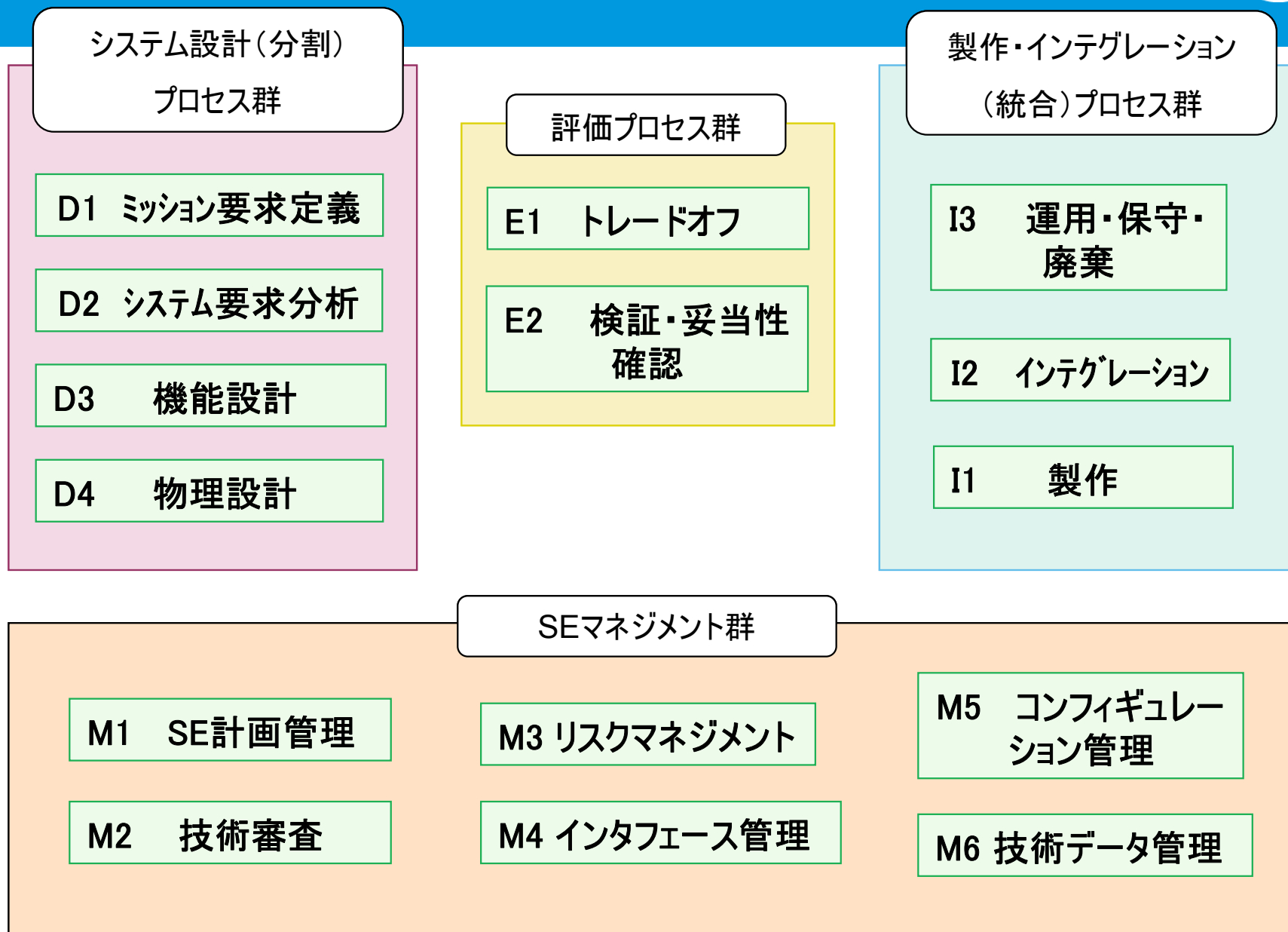
システムの概念を設計する



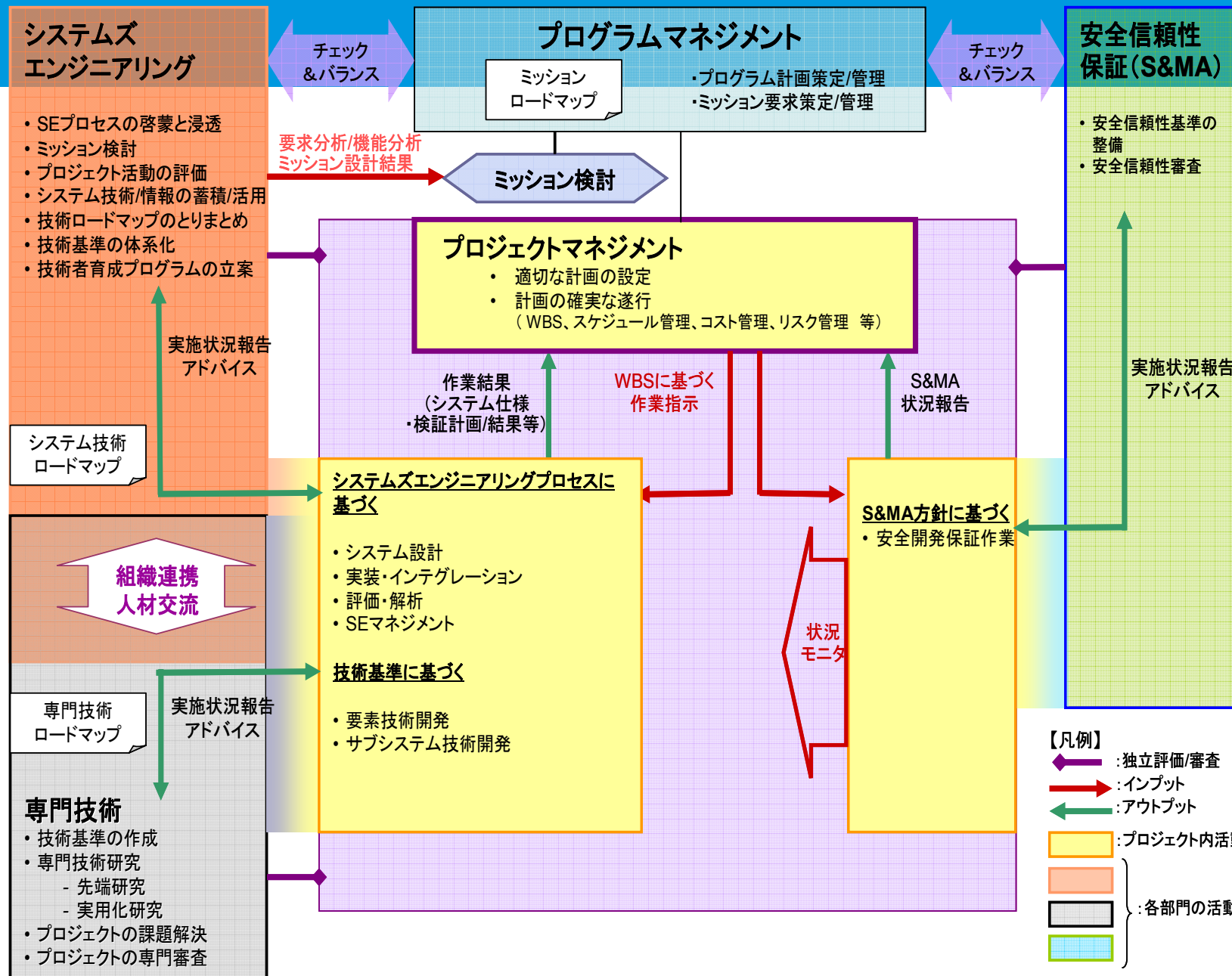
ミッションの目的に対する要求の最適化

- ・ミッションの目的から、ミッションの要求へのブレークダウンには、科学的に高い見識が必要になる。その際に重要なことは、どうしてその要求の結論に達したかについての、トレードオフ過程を明確に記録・共有すること、そして要求の優先順位、特にMUSTの項目とBETTERの項目(さらには、EXTRAの項目)を明示しておくことが重要である。
- ・検討のイテレーションの過程で、ミッション要求の全てを、限られた境界条件の範囲で実現できることは非常に稀であり、その過程において、Best compromiseが必要だからである。もしすべての要求について、並列的にMUST条件とされていた場合、成立解が見いだされなかった時点で、検討は放棄・終了せざるを得ないこととなる。
- ・また、上記の理由から、『馬鹿馬鹿しいと思われるレベル(常識レベルで棄却したこと)』のことまでを含め、検討プロセスは可能な限り網羅的であることが大事である。また、その検討過程が、共有できるよう記録に残すことが重要である。一般的に、一人の人間よりも、多数の人間の知見を集積することは大きな力となる。その際に、既に行われて棄却されたプロセスを、別のチーム員が再度行うことを避けることも必要となるからである。

システムズエンジニアリングのプロセス要素



JAXAのプログラム/プロジェクトマネジメント



Definition(ミッション定義)

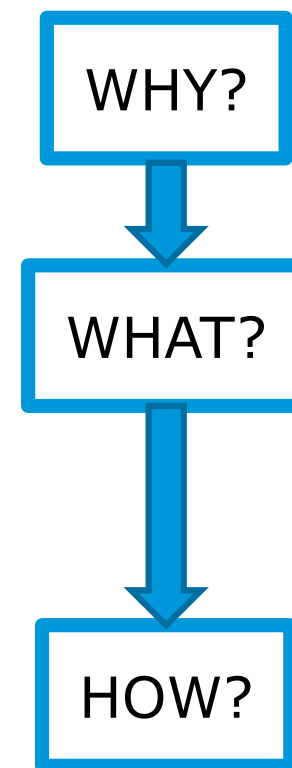
1. “The art and science of developing an operable system capable of meeting mission requirements within imposed constraints including mass, cost and schedule.”
2. Satisfy in a (near-)optimal manner all the requirements
3. Requires trade-offs involving diverse systems and disciplines
 - ✳ a. Propulsion, power, communications, orbital dynamics, thermal, structure, mechanisms, navigation, control, soil mechanics, aero-thermo-dynamics,...
4. You need to identify what the important parameters are and how they are related!
5. Define and compare a small number of different possible scenarios
6. Choose most promising option and perform more detailed design, including space & ground segments, operations, cost and risk

Project Planning

- 1. Purpose and objectives of the project
 - ✱ a. Key questions to be answered
 - ✱ b. Key technical performance parameters
 - ✱ c. Technical and programmatic constraints
- 2. Technology availability and development needs
 - ✱ a. Potential cost and schedule drivers
- 3. Potential cost class (~350M\$, ~500M\$, ~1B\$, and more)
- 4. Ability and need to re-use existing equipment/products
- 5. Availability and need for human resources, skills, technical facilities
- 6. Risk assessment
 - ✱ a. Risk management and mitigation actions
- Development approach:
 - ✱ a. Result from above considerations

Objectives – Requirements - Solutions

- Objective is the high level motivation
 - Which scientific question/application purpose shall the project address and what answer is sought
- Requirement is the translation of this objective into verifiable statements of what is needed to achieve the objective
 - have several levels of detail
 - are traceable, all the way back to the top level
 - Include quantities
- Solution is the response to the all requirements
 - There can be several solutions meeting requirements
 - Non-compliance needs to be negotiated



Mission Objectives

- Science objectives: Objectives should ...
 - ✱ a. respond to important scientific questions or topics
 - ✱ b. state why a space mission is needed clearly (no other approach?)
 - ✱ c. be appealing
 - ✱ to General public
 - ✱ to Science community

- Application objective: Objectives should ...
 - ✱ a. serve an important need of the general public – benefits!
 - ✱ b. state the unique contribution from space (why you need observations in space?)

Why do we need requirements? Very important process!!

1. To provide motivation and focus to the project
 - ✱ a. Communicating to others what shall be achieved
2. Requirements shall
 - ✱ answer the WHY?
 - ✱ by specifying the WHAT?
 - ✱ and not addressing the How?
3. To identify the trade-off for the best solution
4. Place priority on possible solutions/options
5. Priority helps resolving ...
 - ✱ a. Conflicting requirements
 - ✱ b. De-scope paths
6. Provide specifications to engineering and lower level subsystems

Properties of Requirements

1. Mission statement: captures the objectives and measurements required in a single sentence
2. Requirements are formal statements expressing what is needed to fulfill the mission objectives
3. Requirements shall be product related, not process related
4. Clear requirements are key to good design
5. Requirements are hierarchical: lower level system requirements shall come from higher level mission requirements

Requirements – Examples



1. Good Examples:

- ✱ a. The mission shall provide a measurement of the xxx constant with an accuracy better than 10^{-4}
- ✱ b. The mission shall allow scanning of the sky with an angular rate of 20 arcmin/s around an axis of rotation which is $90^{\circ} \pm 1.5^{\circ}$ away from the Sun direction
- ✱ c. The mission shall have a nominal in-orbit duration of 5 years

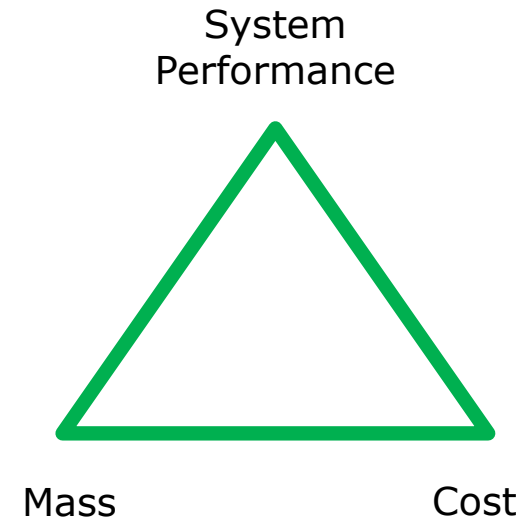


2. Bad Examples:

- ✱ a. The system design shall maximize the spectral resolution
- ✱ b. The mass shall be below 1000 kg

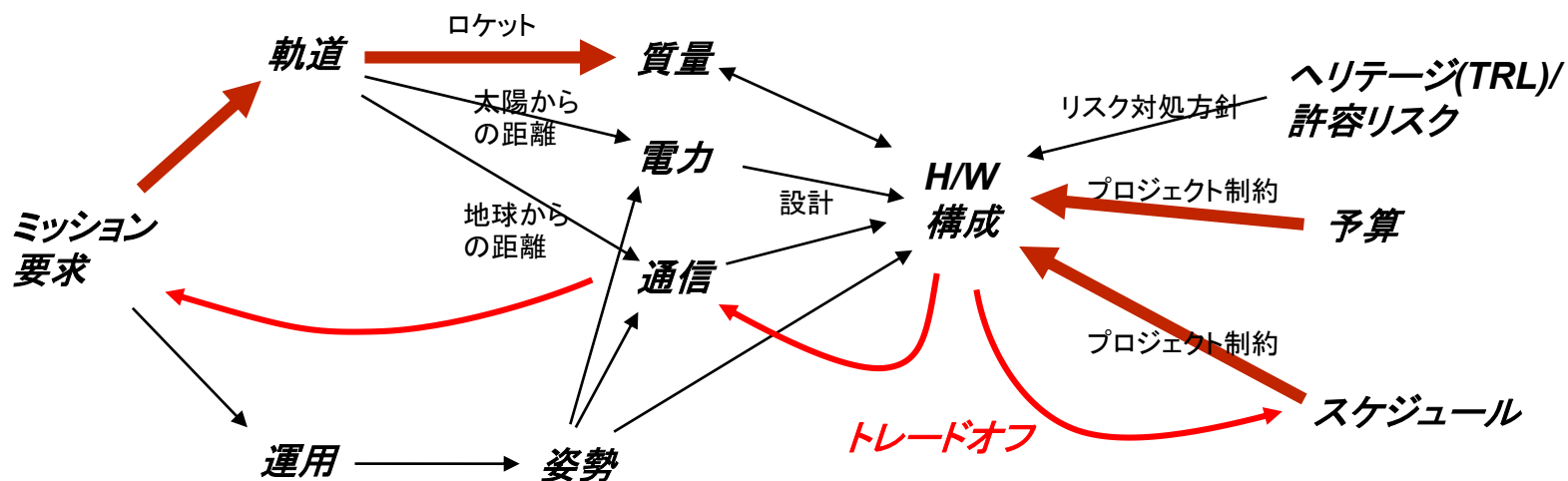
Trade-off

- 1. Trade-off allows exploring alternative solutions to a baseline
- 2. The parameter space needs to be prepared, and an evaluation criterion shall be established using requirements
- 3. Most common criteria: mass, cost; several system properties can be translated into them
 - a. Power consumption ? generation of more power ? solar array size ? mass
 - b. Higher telemetry volume ? larger HGA (High Gain Antenna), more power for communications ? mass
 - c. High performance ? complex solutions ? more effort for verification ? longer integration time ? cost



トレードオフ検討の重要性

- 当然全ての要求が希望通り実現するわけではない ⇒ **トレードオフ**
- 衛星プロジェクトは一般的に強い制約が存在する。
世界的成果を求める (= 要求レベルが高い) 科学衛星プロジェクトは、
なおさら制約の限界に挑戦することになる
 - 制約： 変更できないもの、要求： 変更(妥協)できるもの
 - 制約と決めていたものが本当にそうか、要求が妥協できないか、どこまで上流まで遡って
考えなおすか、柔軟な発想により検討する
- 下記図のような要素間関係とその太さ(関係の強さ)の**共通認識**が重要
- H/W構成レベルを工夫する前に、要求・機能レベルで妥協できないか？



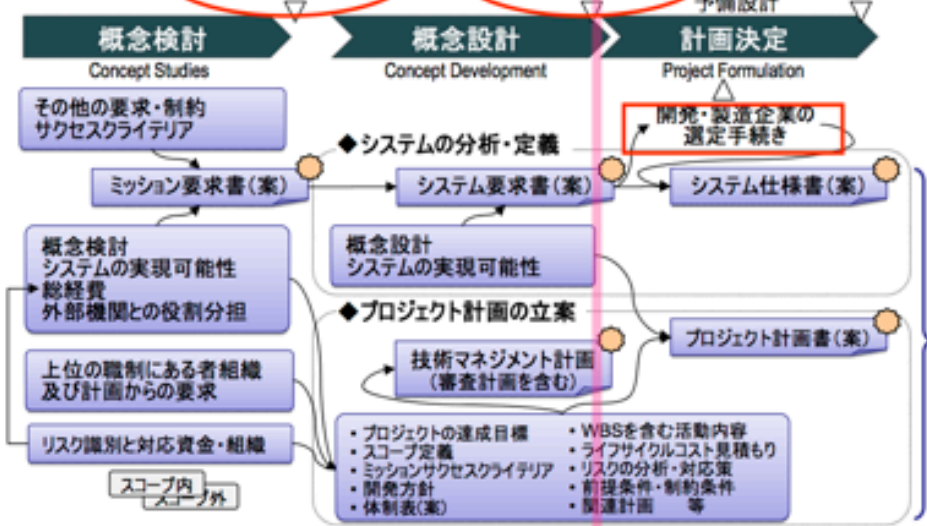
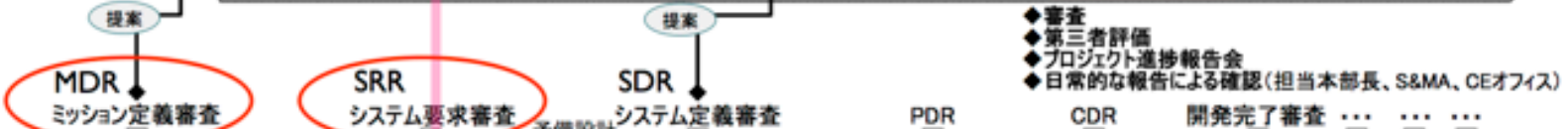
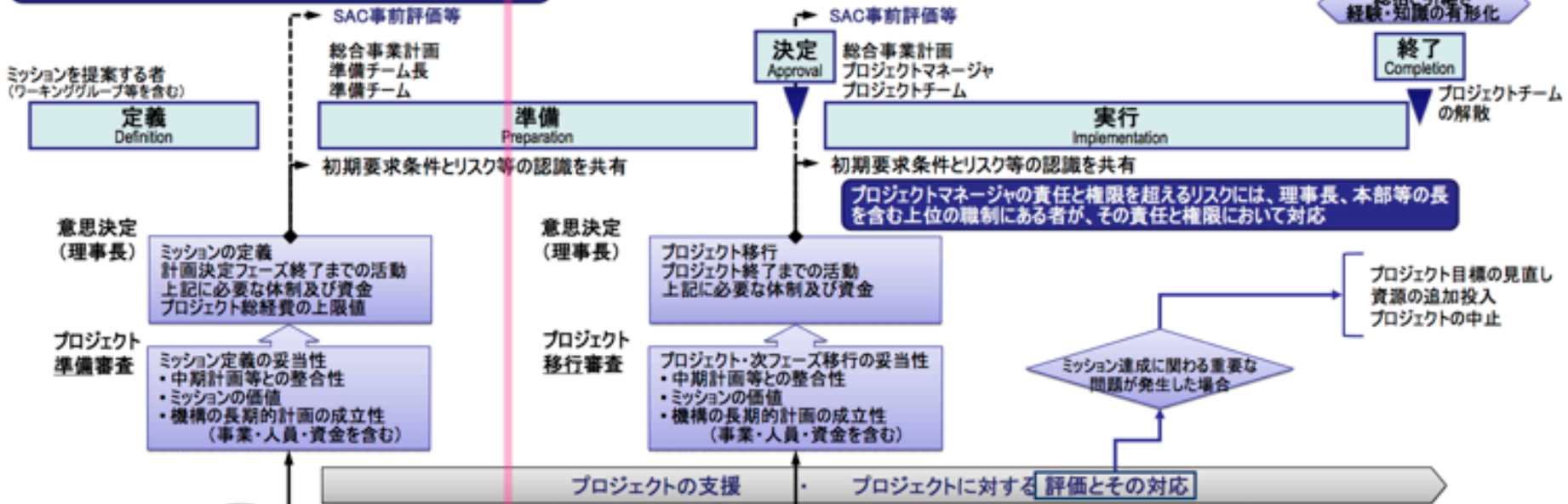
Requirements & Design Drivers

- 1. Identification of design drivers is result of requirement analysis
 - ✱ a. First iteration during definition of mission concept
- 2. Design drivers constrain flexibility of system design ? there should be as few as possible!
- 3. Classification of requirements: unavoidable – negotiable
- 4. Typical (expected) unavoidable design drivers:
 - ✱ a. Mission profile
 - ✱ b. Communications
 - ✱ c. Power generation
- 5. Negotiable (examples):
 - ✱ a. Planning of telemetry downlink
 - ✱ b. Operations constraints

JAXAプロジェクトマネジメントプロセス

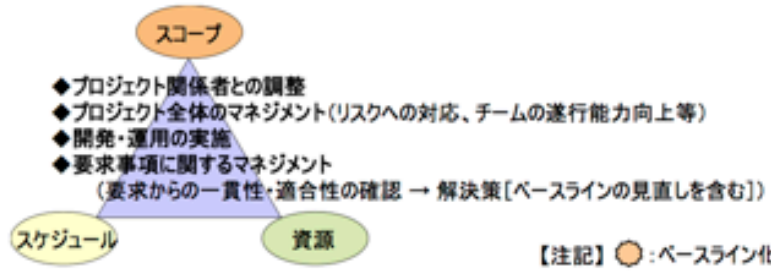
プロジェクトチームを含めた機構ミッションに関わるすべての組織及び役職員は、当該ミッションの達成に向け努力しなければならない。

- ミッションを達成する手段として設定
- 特定の資源と時間のもと時限的組織により実施



プロジェクトマネージャ

- チームの業務を統括する責任と権限
- リスクの低減に努めつつ、最適と考える手法と知識をもってプロジェクトを遂行



Mission Definition

1. “The art and science of developing an operable system capable of meeting mission requirements **within imposed constraints** including mass, cost and schedule.”
2. Satisfy in a (near-)optimal manner all the requirements
3. Requires trade-offs involving diverse systems and disciplines
 - ✳ Propulsion, power, communications, orbital dynamics, thermal, structure, mechanisms, navigation, control, aero-thermo-dynamics,...
4. You need to identify what the important parameters are and how they are related!
5. Define and compare a small number of different possible scenarios
6. Choose **most promising option** and perform more detailed design, including space & ground segments, operations, cost and risk

Thoughts on the explorer (a sample case for a lunar mission)

- Achievement of science objectives generally involves coupling one or more sensing elements to physical parameters of the environment, and measuring the effect.
 - ✱ a. Might be a quasi-continuous time series of one or more parameters, perhaps down-sampled or compressed, either at one location or along the path of the vehicle
 - ✱ b. Might be a field (gravity, magnetic) that varies in time as well as space.
 - ✱ c. Might be a remote measurement or in situ.
 - ✱ d. Might be a passive measurement (seismic monitoring) or an active one (active seismic sounding, Ground-Penetrating Radar)
 - ✱ e. Measurement performance may depend strongly on configuration, deployment and minimization of unwanted effects.

Some techniques with heritage

1. Radio science, in various forms – Doppler tracking, VLBI, signal strength vs. time/location.
2. Laser ranging of passing reflectors on the surface, or the surface itself
3. Gravimetry, gradiometry, seismology
4. Space physics' experiments – magnetic field, electric field, EM (Electric-Magnetic) waves, particles, radiation.
5. Atmospheric physical properties & profiles (measured during descent, remotely from the surface ...)
6. Radar sounding (from orbit, of the surface and/or sub-surface, or ground penetrating probe at the surface, or upward-looking of the ionosphere,...)
7. Heat flow

Mission Phases – Phases 0 & A

1. Phase 0 – Analysis/needs identification

- a. Understanding of functional and technical requirements (correct requirements formulation and priorities), mission statement
- b. Preliminary technical requirement specifications
- c. Conduct trade-off studies to select preferred system concept
- d. Definition of mission concept (design, profile, configuration)
- e. Preliminary assessment of programmatic aspects
- f. Preliminary risk assessment

2. Phase A – Feasibility

- a. Elaborate possible system and operations concepts and propose technical solutions
- b. Initiate pre-development of critical technologies
- c. Conduct trade-off studies to select preferred system concept
- d. Assess the technical and programmatic feasibility of the possible concepts by identifying constraints relating to implementation, costs, schedules, organization, operations, maintenance, production and disposal
- e. Determine uncertainty levels update risk assessment

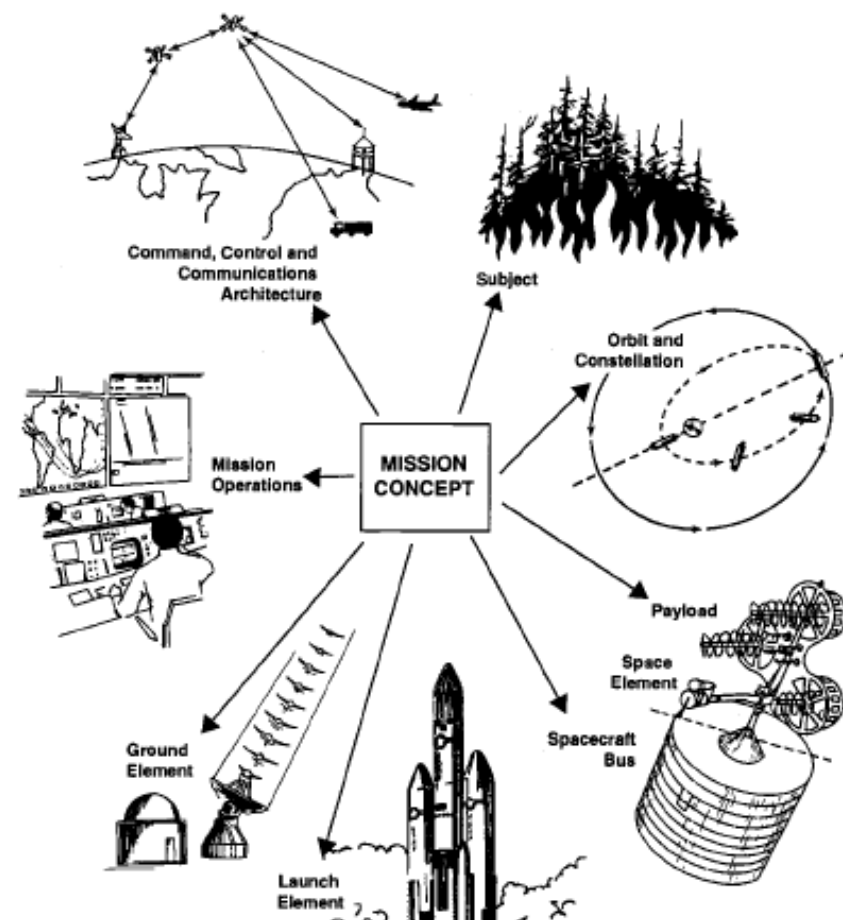
System designs

Study Phase 0:

- Analysis of Mission Objectives
- Analysis of Mission Constraints
- Definition of Science & Measurement Requirements
- Definition of Mission Architecture (s)
- Definition of payload / performance
- Analysis of Environment
- **Iteration / Trade phase**
- Cost, Risk, Schedule, Technology Development

Goal:

- **feasible mission profile**
- **satisfying requirements and constraints**



Mission Phases – Phase B









Phase B – Preliminary Definition

- ✱ a. Confirm technical solution for the system and operations concept and establish preliminary design
- ✱ b. Preliminary organizational breakdown structure
- ✱ c. Establish baseline master schedule and cost
- ✱ d. Identify and define external interfaces
- ✱ e. Finalize product tree and establish subsystem requirements and preliminary subsystem design
- ✱ f. Initiate long lead item procurement
- ✱ g. Update risk assessment

Mission Phases – Phase C

Phase C – Detailed Definition

-  a. Detailed system and subsystem design
-  b. Performance simulations
-  c. Mathematical models (thermal, power, structural; observation, comm., etc)
-  d. Initiate production and qualification of engineering and qualification models
-  e. Detailed definition of internal and external interfaces
-  f. Update of risk assessment

Mission Phases – Phase D

🌟 Phase D – Production & Qualification

- ✳ a. Completion of qualification testing & verifications (thermal-vac, vibration, EMC, etc)
- ✳ b. Manufacturing, integration and test of flight hardware
- ✳ c. Verification of operations with ground segment

🌟 Phase E – Utilization

- ✳ a. Launch preparations and launch
- ✳ b. in-flight verification (commissioning)
- ✳ c. Mission operations planning
- ✳ d. Science operations planning
- ✳ e. Data analysis/exploitation

🌟 Phase F – Disposal

- ✳ a. Mission disposal (space debris mitigation)
- ✳ b. Data archiving and final documentation

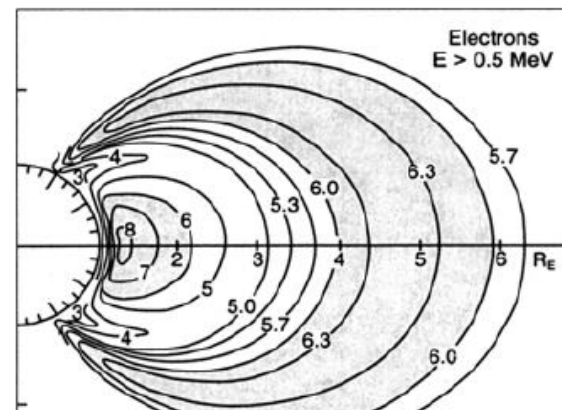
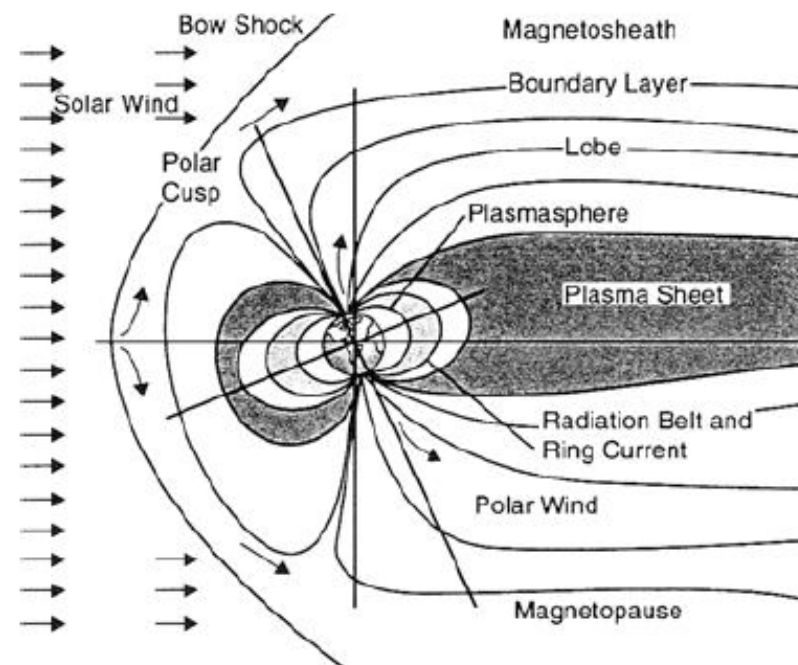
Margins – Contingencies

1. Equipment level margins according to maturity
 - ✱ a. 5% for off-the-shelf items (no changes)
 - ✱ b. 10% for off-the-shelf items with minor modifications
 - ✱ c. 20% for new designs, new developments, major modifications
2. System margin (at least 20%)
 - ✱ a. On top of and in addition to equipment margins; applied after summing best estimates + margin
 - ✱ b. Two options for the propellant calculation +10% margin + 2% residuals
 - ✦ Margin on total dry mass and margin on launcher: typically used during early study phases +10% margin
 - ✦ Margin on maximum separated mass: typically used later, when mission analysis and launcher analysis become available
3. Always keep lots of margins
4. Margin philosophy for Science Assessment Studies”

Space environment

- Solar cycle (11-years) – flares
Solar Protons: 1 MeV to > 1 GeV
- Radiation belts of Earth, Jupiter,...
electrons, protons
- Cosmic Rays
- Spacecraft charging
- Magnetic Field
- Solar Radiation Pressure
- Thermal environment
- Vacuum: Atomic Oxygen

- **Radiation effects electronics,
materials and increase noise in
detectors**



From mission definition into system definition

- Generally speaking, **numbers of mission definition could apply the mission objective.**
- System definition has the same situation as above.
 - ✳ We have various types of choices of system definition to satisfy the mission (science) objectives, however the most feasible(*) one is unique. **"Best compromise"**
- **[Exercise]**
- Suppose that you were requested to measure the mass of Mars.
 - ✳ How do you approach without Wikipedia or current knowledge?
 - ✳ You could find so many approach to realize it.
 - ◆ then you have to choose the best way to measure it.

● *feasibility is usually on the balance of budget, necessary resource, and risks.

システムズエンジニアリングは

- この手法を用いたからと言って必ず良いミッションが出来る訳では無い、あくまで検討を助ける手法である
- 良いミッションを提案できるためには、『良いアイデア』が無くてはあり得ない。一般的に、宇宙科学は既に複雑系の学問領域に踏み込んでいることもあり、『思いつき』では無く、十分な科学的な検討が必要である。これまでの知見の蓄積も十分に調べる必要がある。
- 多くのミッション提案の評価に関わっていて感じることだが、多くの提案チームが『自分が何を要求しているのか』を理解していない場合が多い。(そんなことがあるのか？ と思うかも知れませんが。)
- さらに、自分の目的としていることと、提案しているミッションの要求が、実は対応していないケースが多い。
- まず、自分が何をやりたくて、そのためにどのような要求(何をするか)を自分(提案チーム自身)に問いかけることが重要である。それも、定性的では無く、定量化しておく事が重要である。

From science into space mission

- We had plenty of “zone-of-avoidance” in any scientific field, at the very beginning phase of space sciences.
 - ✳ New types of observations promised us tasty fruits in those days.
- In these days, scientific observations have accumulated more and more in most of fields of science, we have to carefully consider the best approach to get a breakthrough or a new scientific result.
- No good fruits found at the lower trees, said Dr. Fabio Favata (ESA) in his seminar at ISAS (Sep. 2016), which is generally “YES”.
- To find out the best approach (suitable mission), systems engineering is one of very important scheme to address the mission design.