

システムズエンジニアリング初級研修番外編 あるいは私のシステムズエンジニアリング

満田和久

(国立天文台技術主幹/ATC)

第40回 天文学に関する技術シンポジウム（2021年1月28日）

国立天文台で耳にした／目にした違和感

- 以下のような文脈でシステムズエンジニアリングが使われてると感じた。
 - システムズエンジニアリング (Systems engineering = SE) とシステム設計(system design) は同一である。
 - システムエンジニア (System/systems engineer) が行うことの全てがシステムズエンジニアリングであり, システムズエンジニアリングを行うのはシステムエンジニアである。
- この違和感は「システムズエンジニアリング」「システム設計」の定義に依存し, それは人によって異なるかもしれないが。。
- その意味で「私のシステムズエンジニアリング」による違和感かもしれない。。。

技術系職員の人材育成に関する基本計画(EP-TD-002)

セクション4.2脚注のSE定義

- ・ システムズエンジニアリングとは、ステークホルダー要求からミッションの完結までを、確実かつ出来る限り効率的に実現することを目標に開発された手法・プロセスの集合体である。
- ・ ミッションシステム設計とは、システムズエンジニアリングの手法も活用しつつ、熱・構造・電子回路・信号処理など多様な個別設計技術を集結し、具体的なミッション装置をシステムとして検証方法を含めて設計することを意味する。
- ・ 上記のシステムズエンジニアリング定義は実は不十分
- ・ しかしJAXAの定義は意味がわからない…
- ・ 私の日本語力の問題かも。。。
 - ・ 英語の教科書を見てみよう！

参考：JAXA, BDB-06007B

システムズエンジニアリングは、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。

NASA's SE handbook

approachの一語で、考え方とプロセスの両方を表現している。

順序だった、規律ある、考え方・やり方

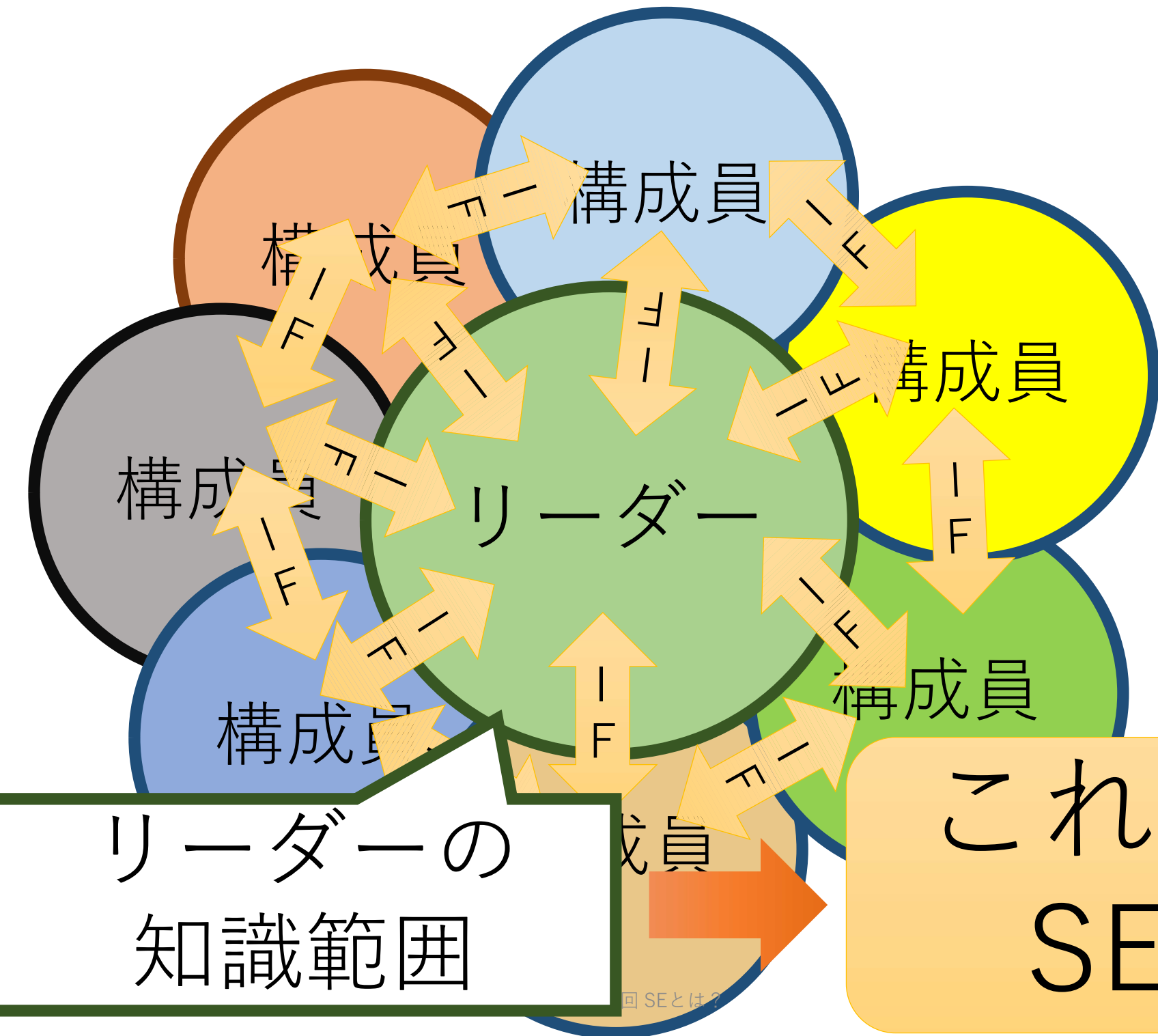
- Systems engineering is a methodical, disciplined approach for the design, realization, technical management, operations, and retirement of a system. システムの破棄
- A “system” is a construct or collection of different elements that together produce results not obtainable by the elements alone.
- The elements, or parts, can include people, hardware, software, facilities, policies, and documents; that is, all things required to produce system-level results. 過去の文献=過去から集積された知識の意味
- The results include system-level qualities, properties, characteristics, functions, behavior, and performance.

NASA SE handbook (SP20007-6105r1), section 2

野田さんSE研修でのシステムの定義



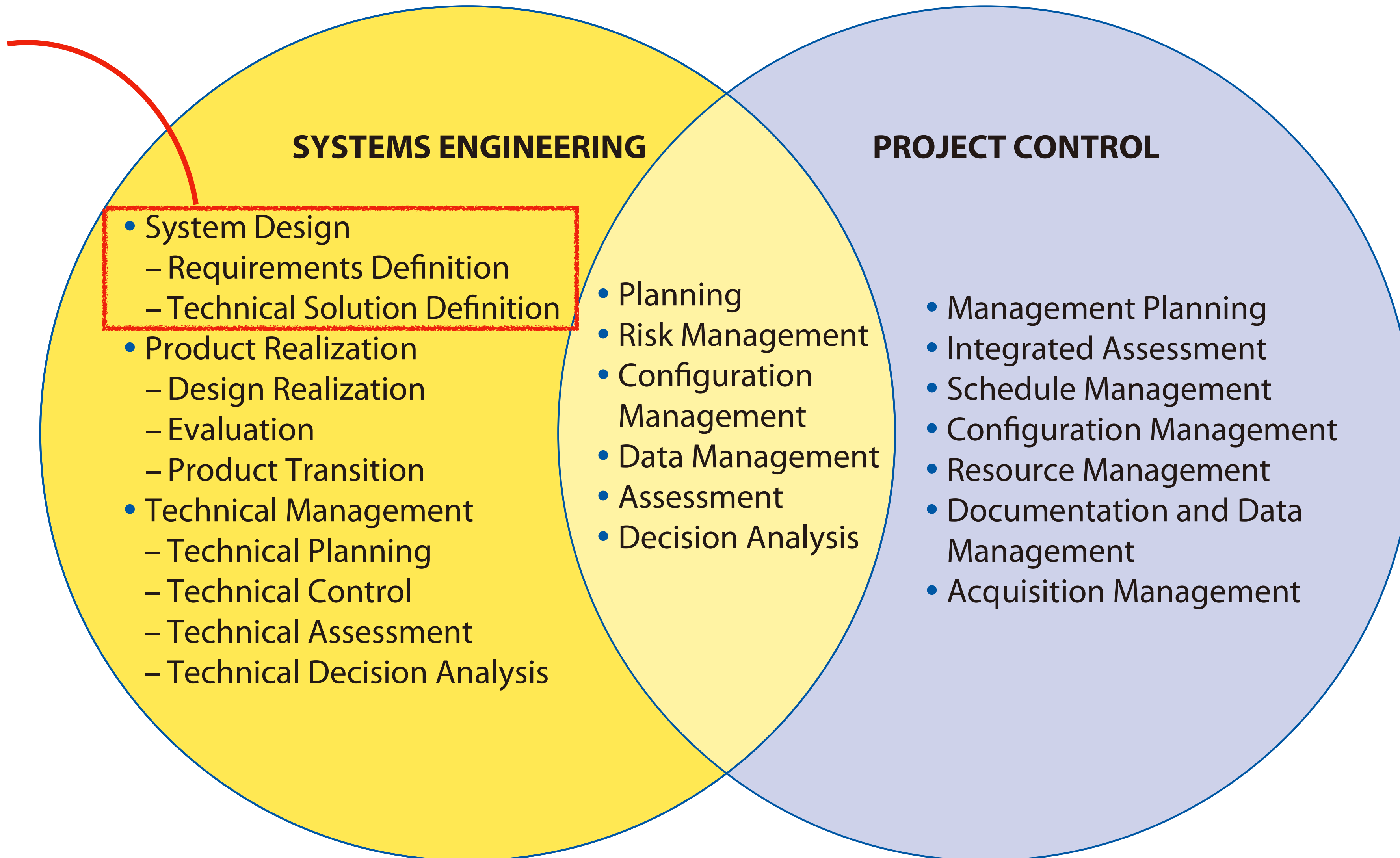
これはシステムじゃない
作るのに、SEは必要じゃない



elementsとして"people"に焦点をあてた図

SE in overall PM (from NASA's SE handbook)

system
designはSEと
異なる軸に分
厚い厚みを有
している



SE engines (from NASA's SE handbook)

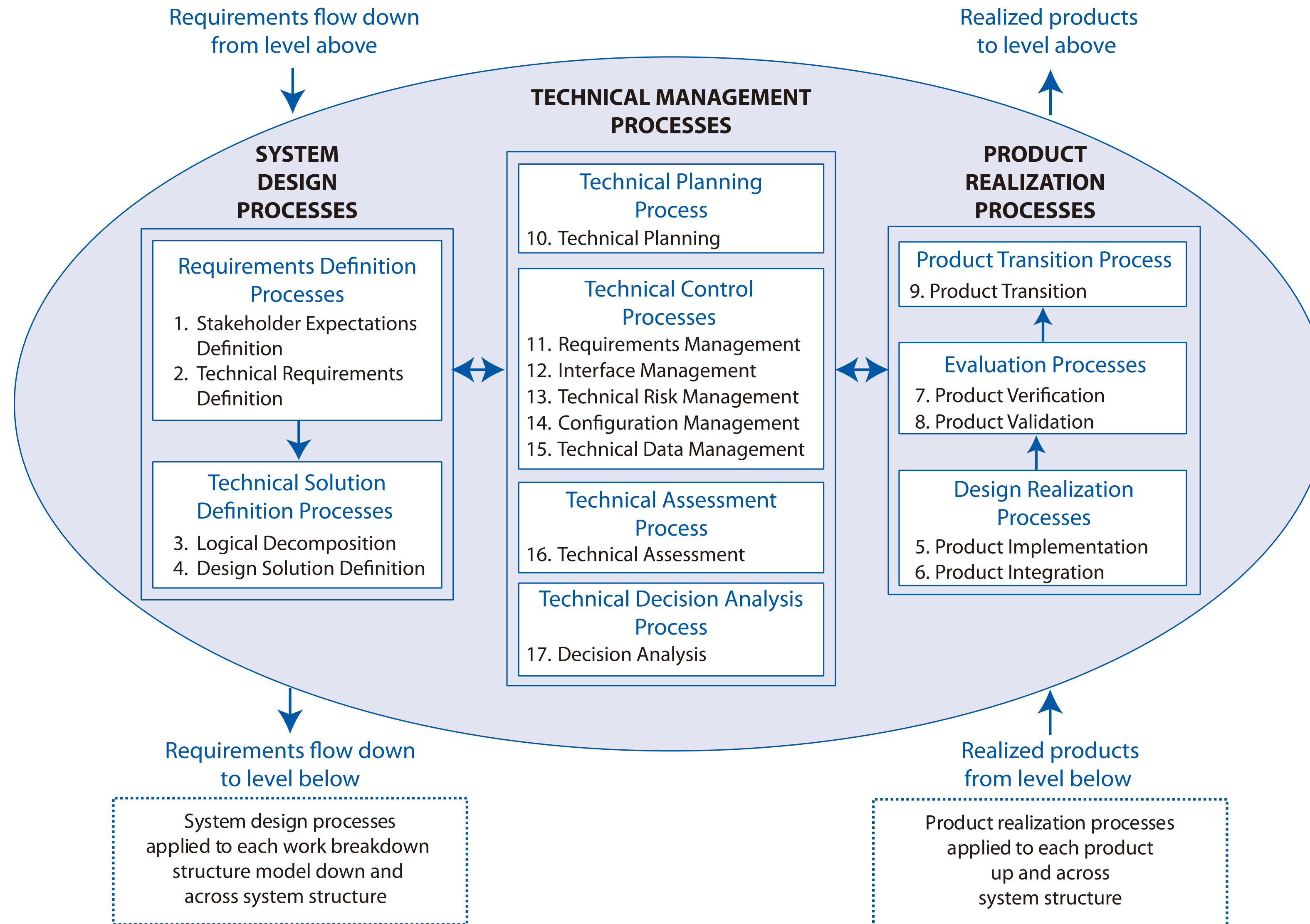


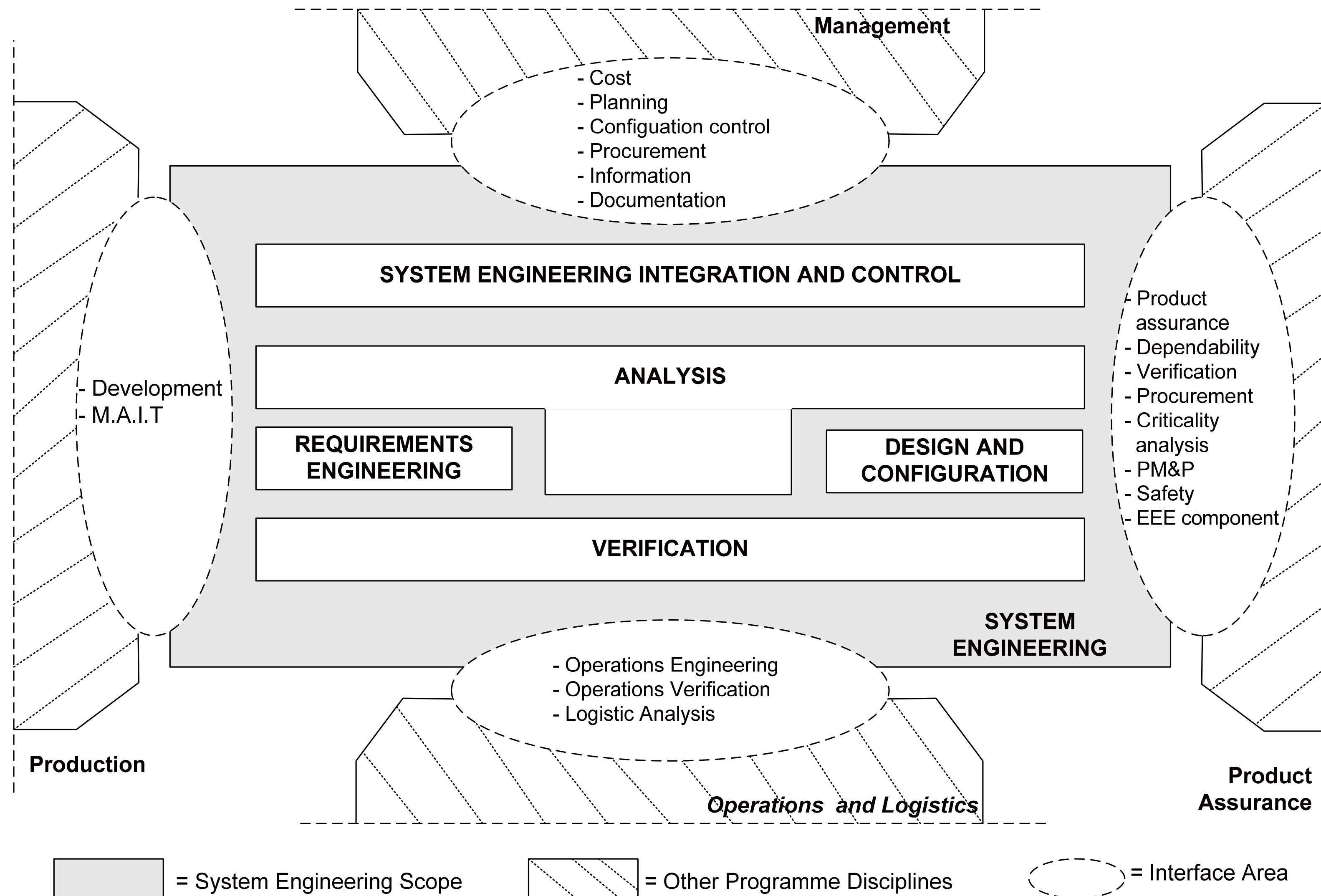
Figure 2.1-1 The systems engineering engine =プロセス群

ECSS: ESA's standard

分野横断の、考え方・やり方

- System engineering is defined as an interdisciplinary approach governing the total technical effort to transform requirements into a system solution.
- A system is defined as an integrated set of elements to accomplish a defined objective. These elements include hardware, software, firmware, human resources, information, techniques, facilities services, and other support elements.
- In this standard the concept of “system” is used in a wide sense. The highest level, often called “mission level” or “space system”, consists usually of one (or more) space segment(s), of a ground segment, and of a user segment. Elements of system decomposition are also considered a system. For the purpose of this standard the system can be any element at any level of decomposition as defined by the function tree or the product tree.

Perimeters of SE (from ESA's standard)



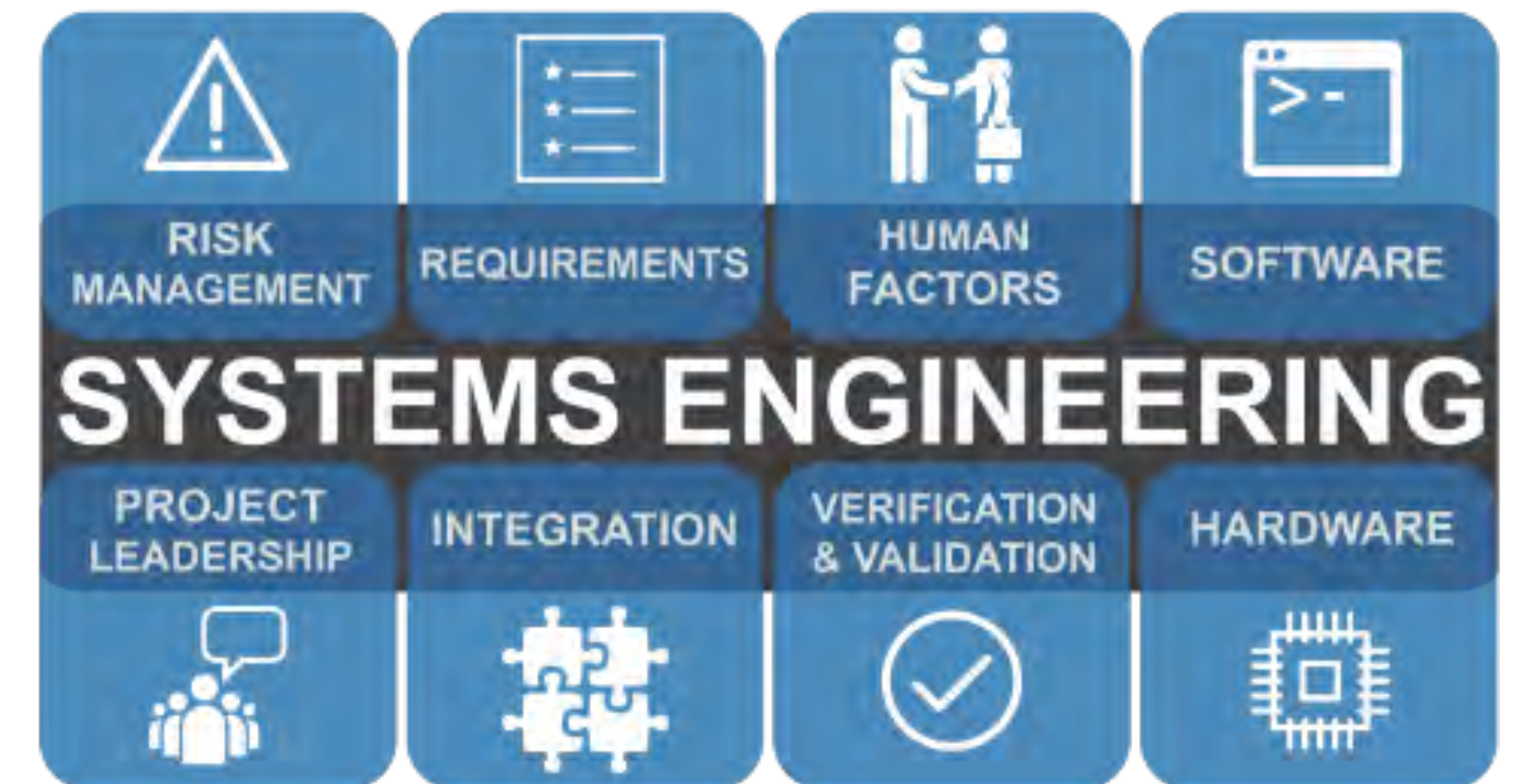
MAIT = manufacturing, assembly, integration and test
 PM&P = parts, materials and processes

INCOSE's definition

分野を超えた, 統合的な, 考え方・やり方

- Systems Engineering is a transdisciplinary and integrative approach to enable the successful realization, use, and retirement of engineered systems, using systems principles and concepts, and scientific, technological, and management methods.
- We use the terms “engineering” and “engineered” in their widest sense: “the action of working artfully to bring something about”. “Engineered systems” may be composed of any or all of people, products, services, information, processes, and natural elements.

INCOSE - International Council on Systems Engineering
<https://www.incose.org/systems-engineering>



結論

Systems engineering は, approach である。

Cambridge Dictionary

Approach = a way of considering or doing something.

辞書の例文

Since our research so far has not produced any answers to this problem, we need to adopt a different approach to it.

考え方, やり方

システムズエンジニアリング的な考え方

The motto of SE (<https://omegalpha.org/why-omega-alpha/>)

システムズエンジニアリングの基本的な考え方 (JAXA, BDB-06007B)



“Think about the End before the Beginning”

–The philosophy of Leonardo da Vinci

つまり, 「Systemのretirement まで考えなさい, 始める前に。」

In September of 1513, Pope Leo X said "This man will never accomplish anything! He thinks about the end before the beginning!"
(http://www.bibliotecapleyades.net/davi/davincicode_fulcanelli03.htm)

システムズエンジニアリング的な考え方は実験屋の心得

JAXAの初代統括チーフエンジニアであった向井さんの考え

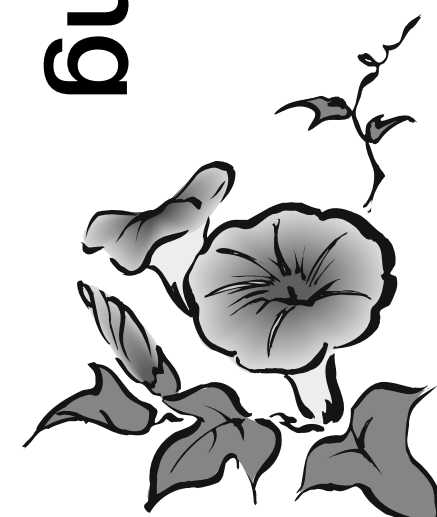
私もそう思います。



Think About the End
Before the Beginning

東京支部支部長

向井利典（昭41年卒）



ここ数年、個人情報保護法の施行とも関連して、洛友会は大きな

変革の過程にあります。東京支部においては、特に若手会員の参画意識の向上策として講演会の開催や勉強会の立上げなどに力を注いできました。また、従来から卒業

業年次毎に学年幹事を設けていま

実験屋の心得 < 向井利典 >

“Think about the end
before the beginning”

- レオナルド・ダ・ヴィンチの言葉 -

1) “Think about the end before the beginning.”

この言葉の意味するところを、実験の計画立案、準備、セットアップ、データ取得・処理・解析、全ての段階で肝に銘じること。

2) 物理的感性を磨く

データを素直に見て不思議を感じる物理的感性を磨け。それは、普段からどれほど考えているかによる。また、自分が明できないとき、その解決を後回しに

<https://sprg.isas.jaxa.jp/researchTeam/spacePlasma/projects/kokoroe2/kokoroe2.html>

3) 「不思議」結果は人為的原因

「不思議」な結果は、往々にして、実験の方法や条件、データの取り方などの間違った人為的原因によることもある。実験の基本動作を身につけ、やるべきことを

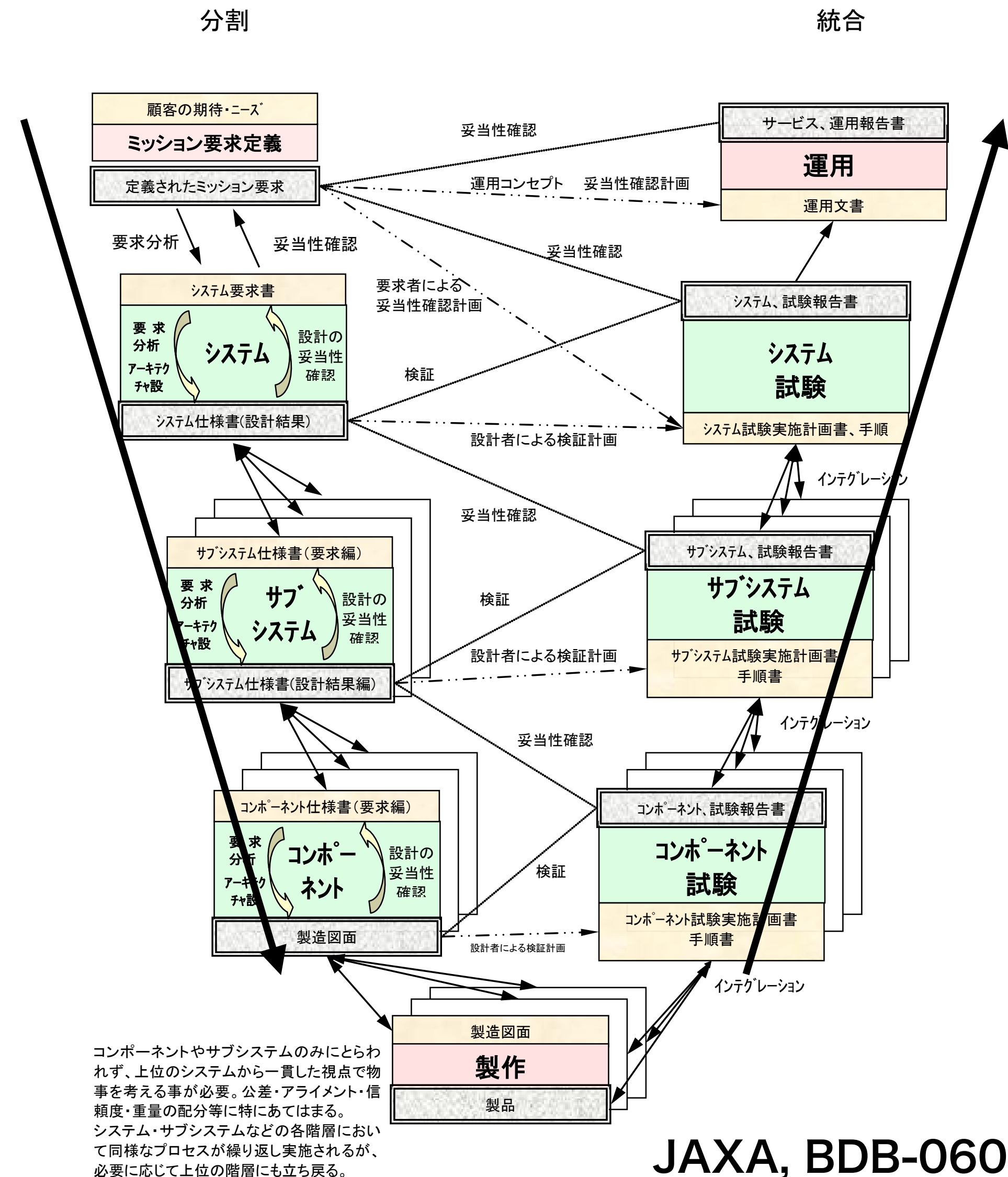
洛友会 会報

(京都大学電気系専攻の集まりらしい)

ナルド・ダ・ヴィンチが言ったとされています。レオナルドは、本業の有名な画家としてだけでなく、科学技術の広範な分野に足跡を残した万能の天才でありましたが、この言葉は「システムズ・エンジニアリング」(Systems Engineering、以下、SEと称する)の真髄を表すものと紹介されています。なお、SEを日本語に直すと「システム工学」となるのですが、ゲルで検索すると38万件余りにヒットします。ハード、ソフトにかかわらず、何か新しいものを開発しようとするとき、システムという捉え方によりエンジニアリング

つーれも前の白にし析さつ田のオ

システム開発のVモデルとSE engines (1)

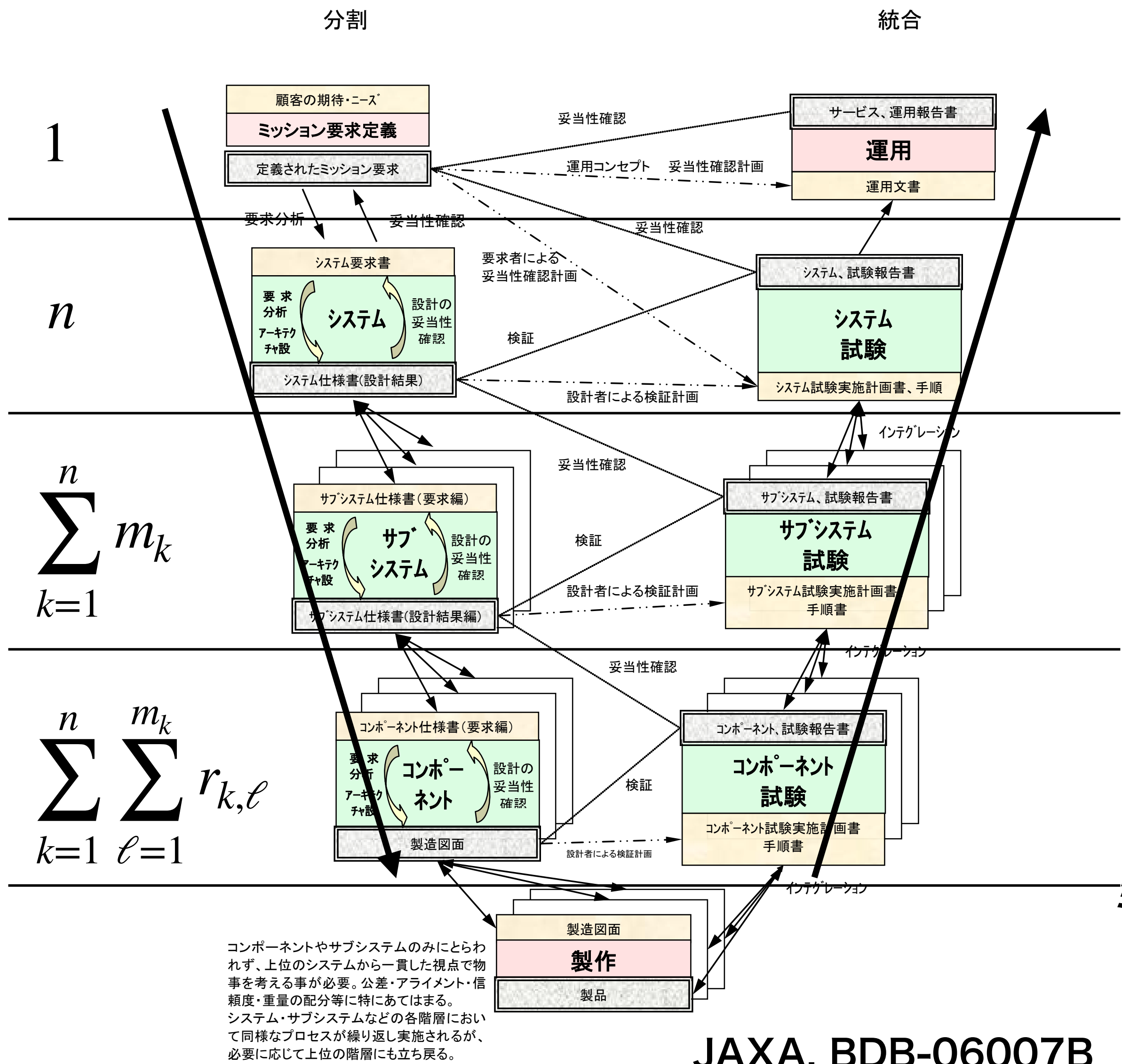


- システム開発のVモデル
- ミッション定義から出発して、システム、サブシステム、コンポーネントと分解し、コンポーネントを製作し、試験をし組み立て、試験する。
- 開発は、左上から中央下に、そして右上に時間とともに流れ行く、と思うかもしれない。
- 実はそうではない。

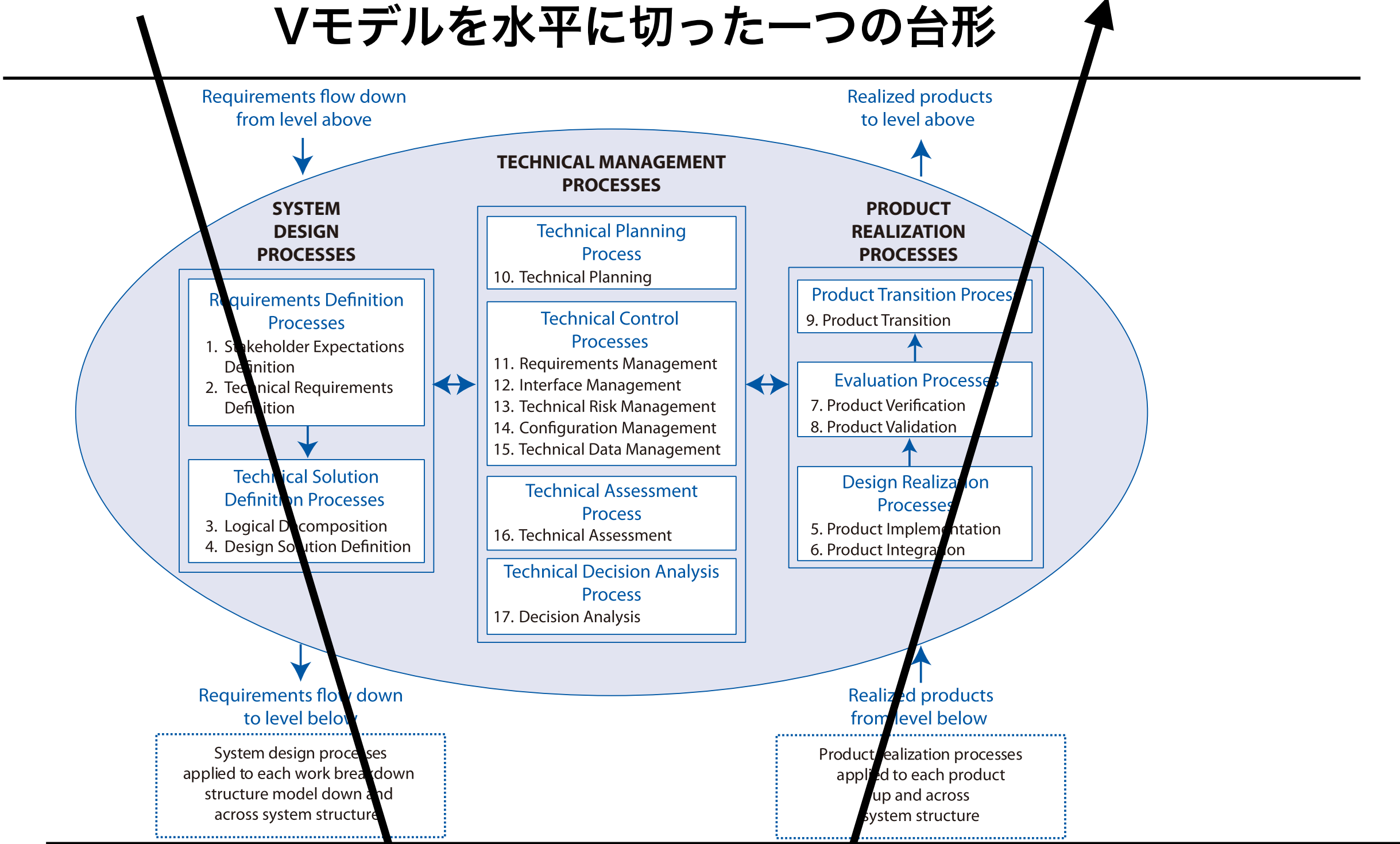
JAXA, BDB-06007B

図 2-1 システム開発のVチャート

システム開発のVモデルとSE engines (2)



JAXA, BDB-06007B



NASA SE handbook (SP20007-6105r1)

ミッション/システム/サブシステム/コンポーネントの階層と構成要素毎に
 $n = 3, \bar{m} = 10, \bar{r} = 10$ なら, 333個

c.f. ESA' standardのsystemの定義

段階的开发とV字モデル

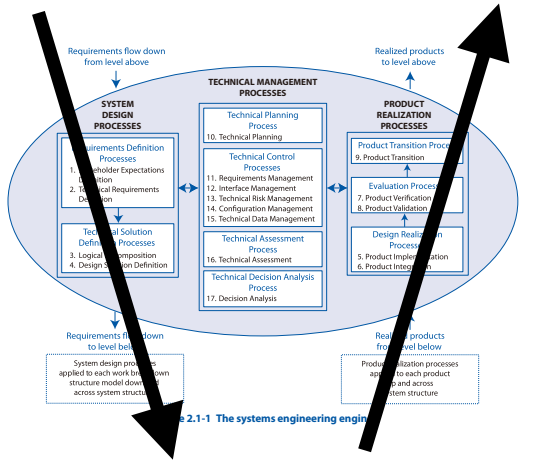
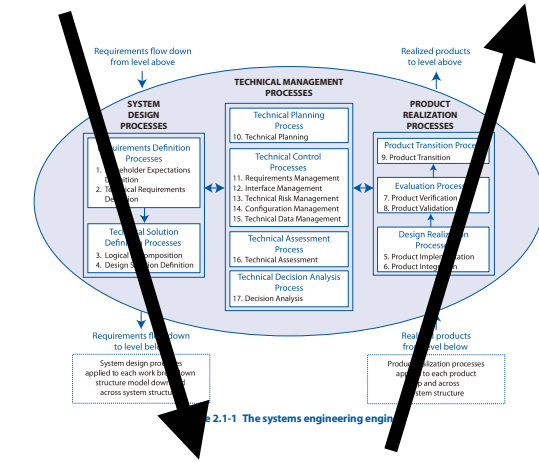
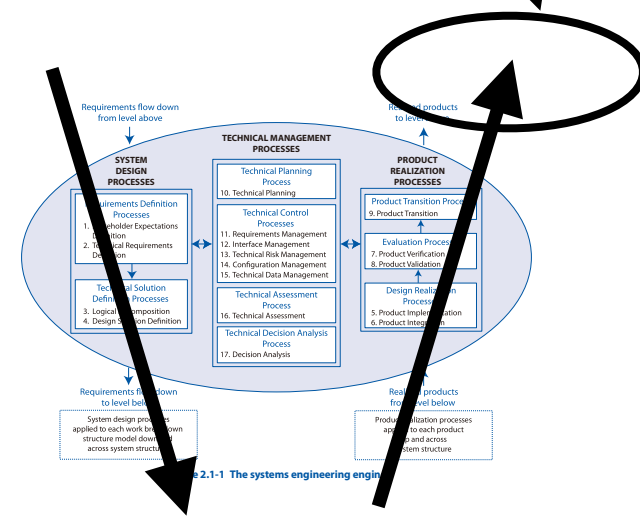
realization productsは
段階毎に定義される

開発の中で、何度も V字モデルを確認する

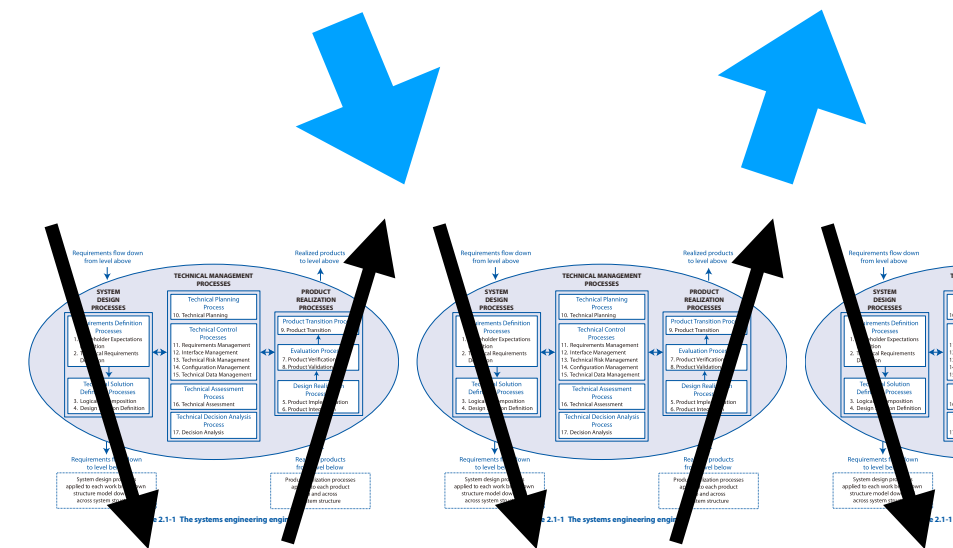
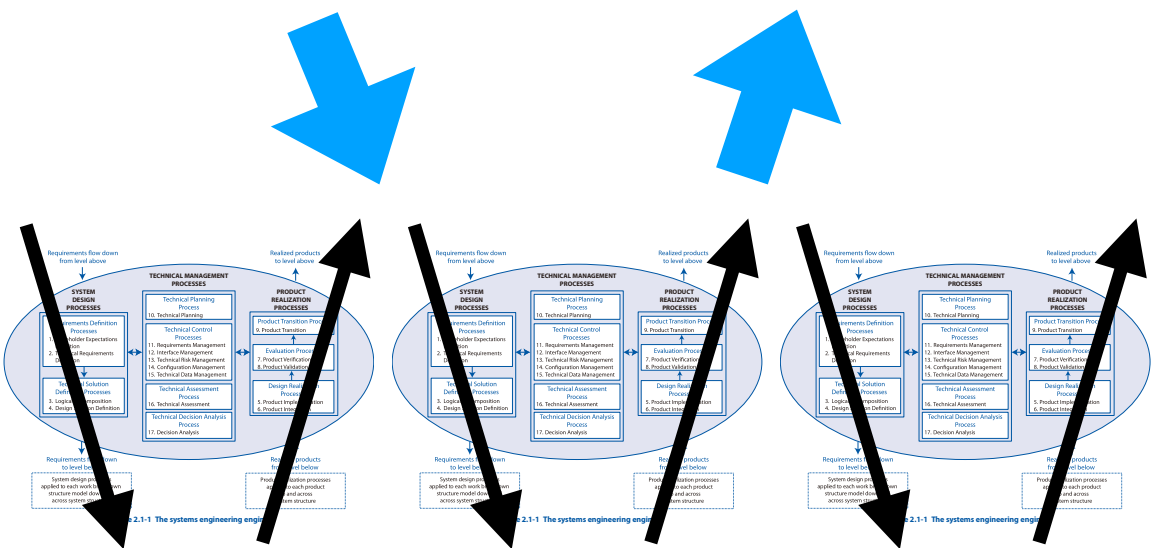
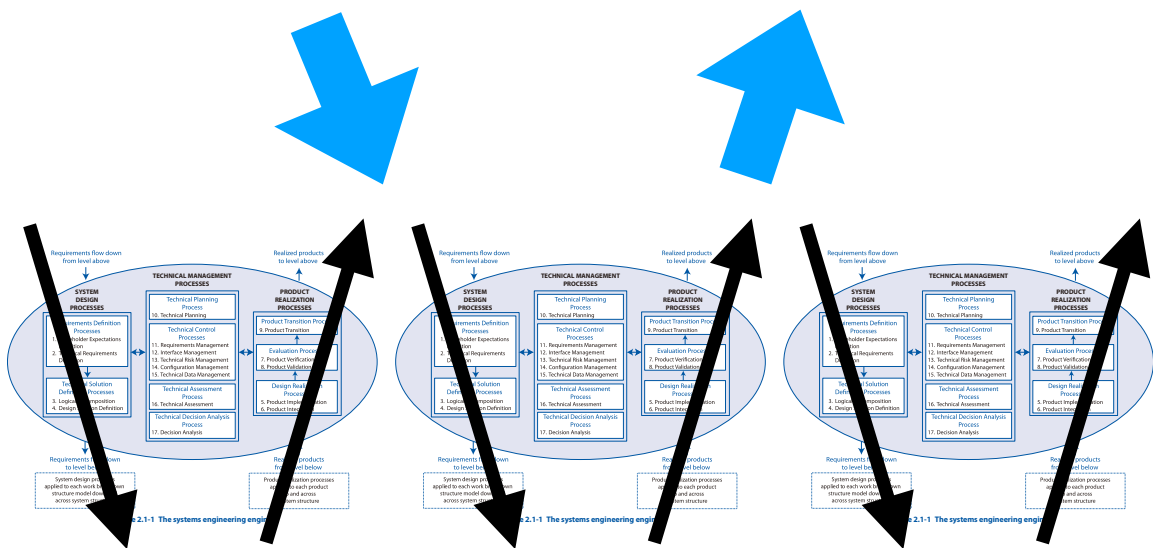
時間



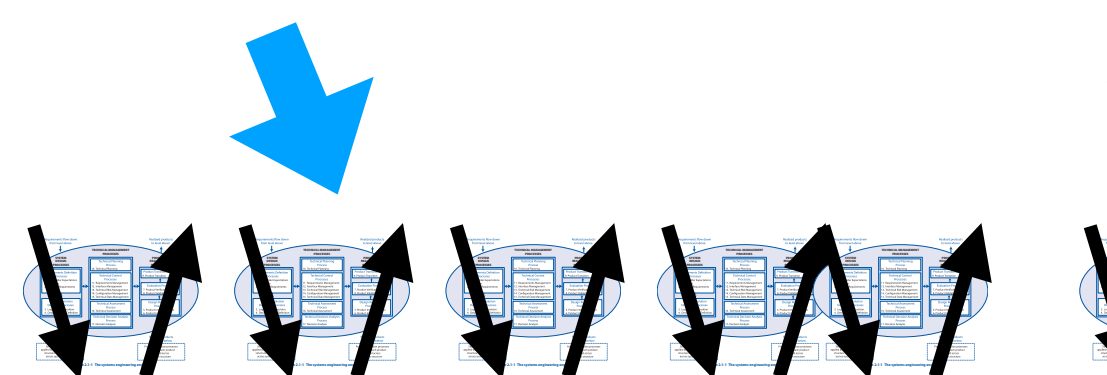
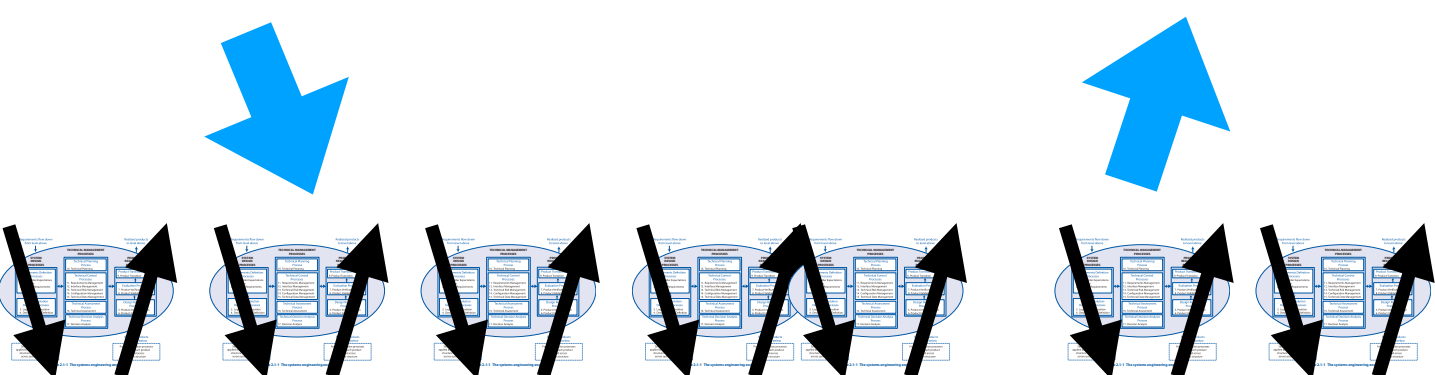
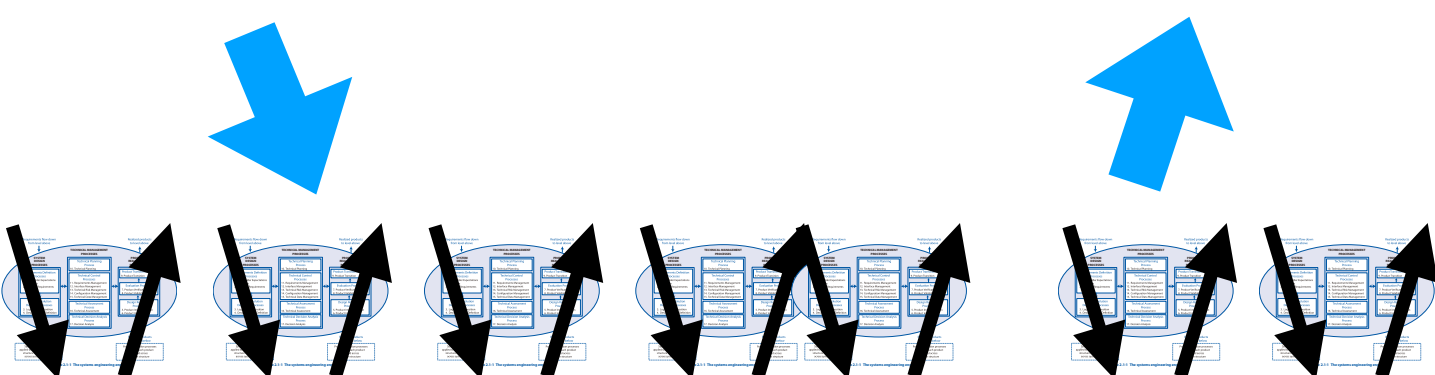
ミッションレベル



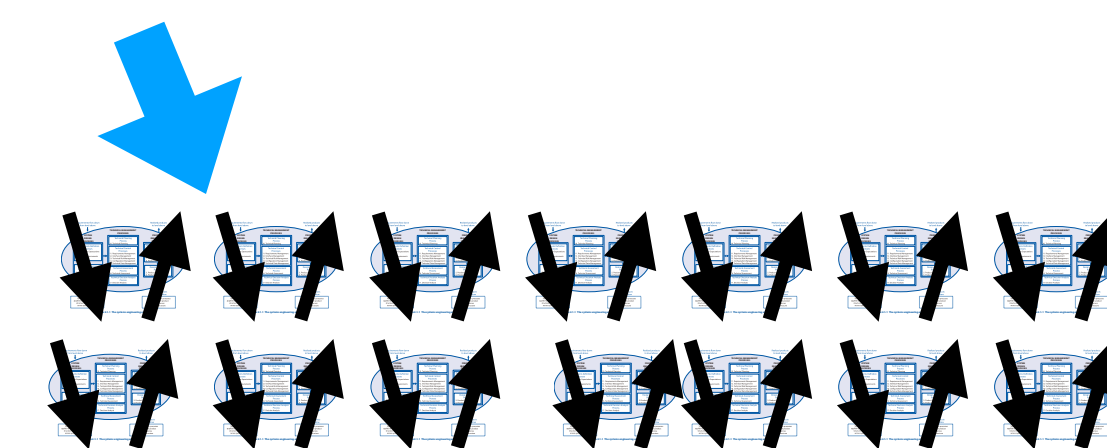
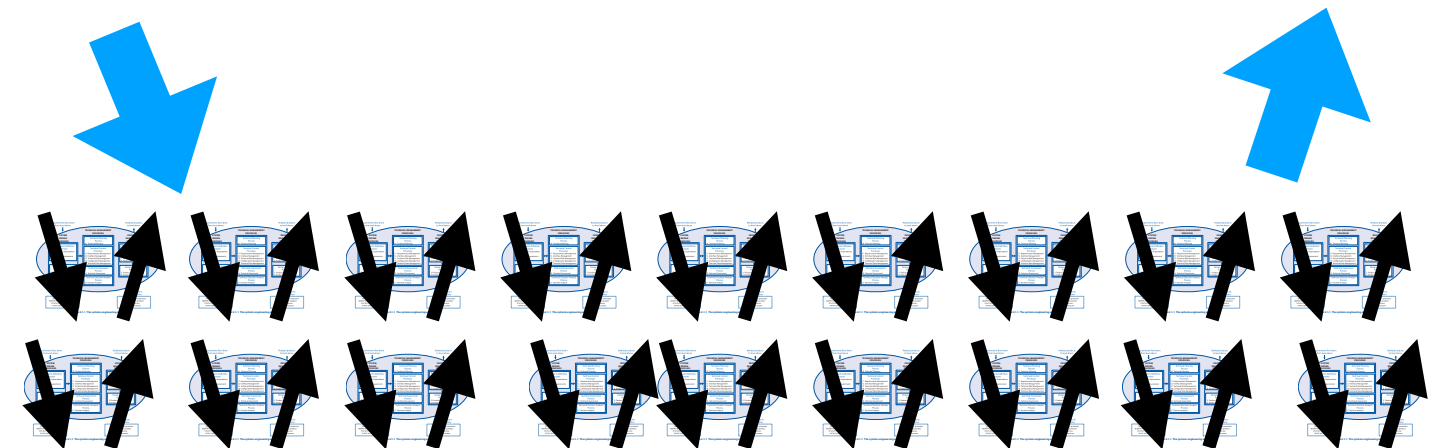
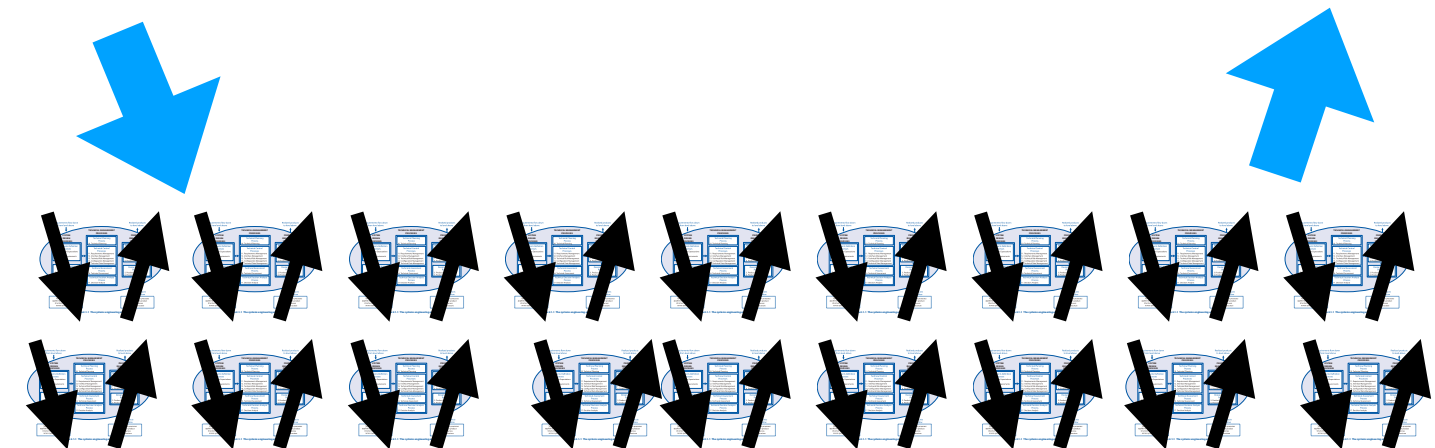
システムレベル



サブシステムレベル



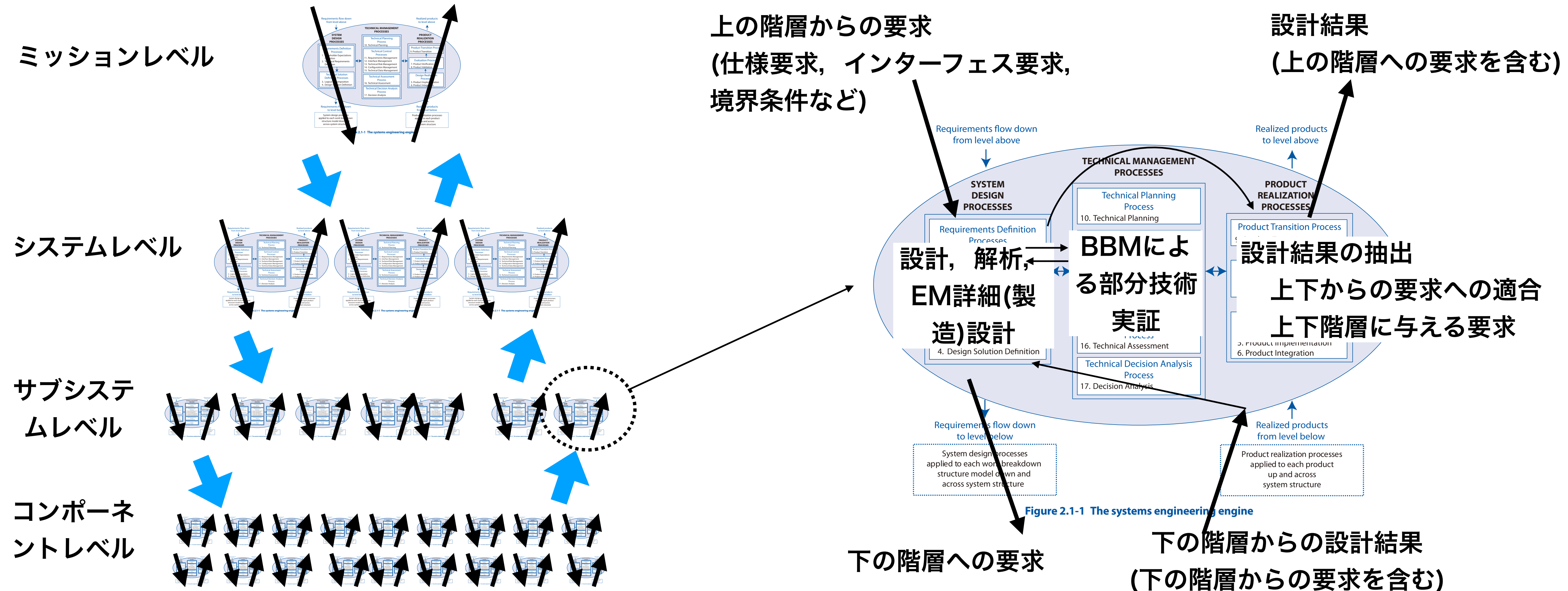
コンポーネントレベル



段階的開発とSE engines

例えばJAXAの基本設計段階

(全体が矛盾なく成立するまで繰り返す)



段階的開発

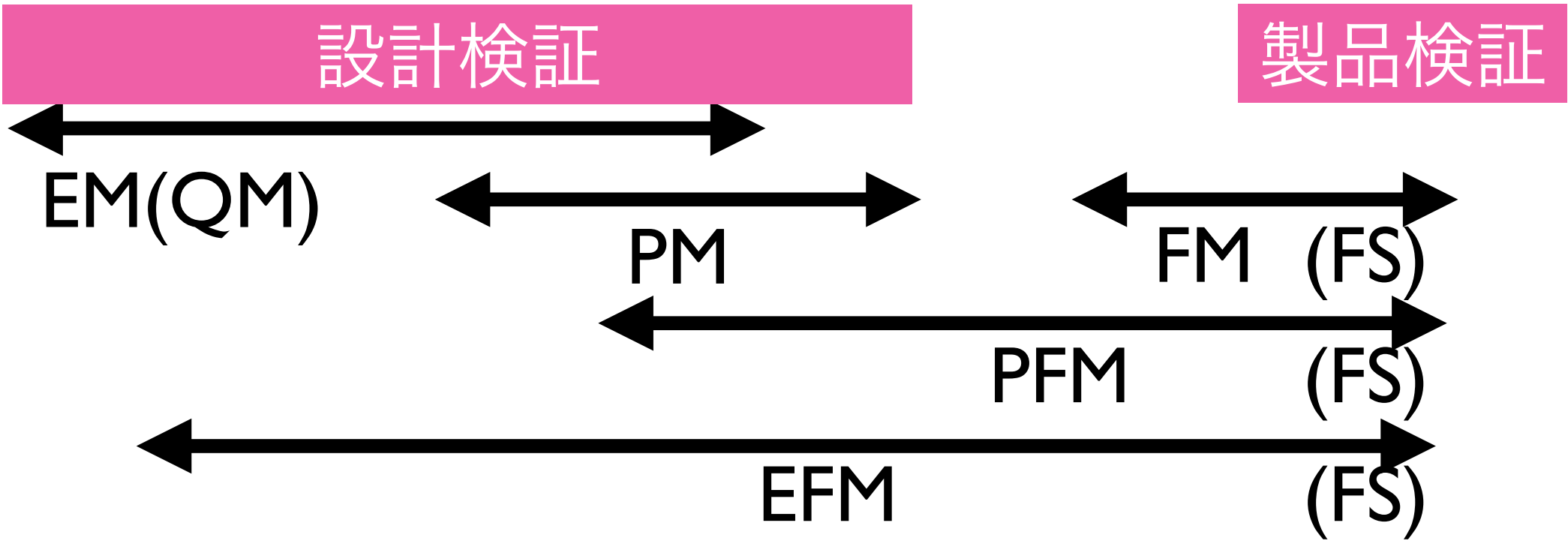
System design & Product realization

ミッション目的の trade off, 達成手 段(検証方法を含む) の探索とtrade off, 設計解を1以 上見つける	ミッションコン セプト(ミッ ション目的と達 成手段)の再検 証, 選択と決 定, 開発方針の 決定	システムか らコンポー ネントまで の設計と設 計検証	システムか らコンポー ネントまで の設計検証 と製造設計	製造と 製品検 証	運用と 保全	廃棄
---	--	---	---	-----------------	-----------	----

製造設計と検証を見据えた上流設計 製造設計

Technical management

(高リスク/キー技術の)技術開発

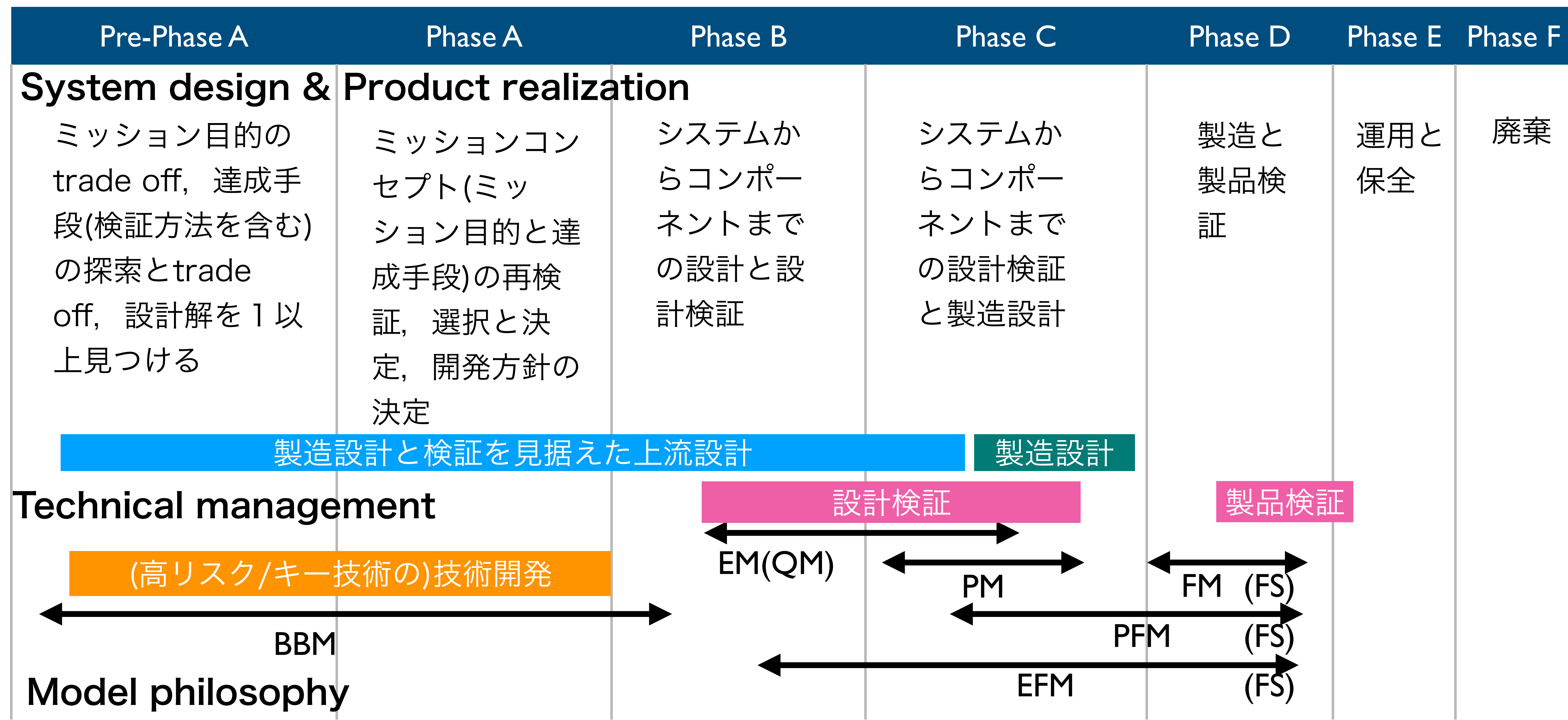


BBM

Model philosophy

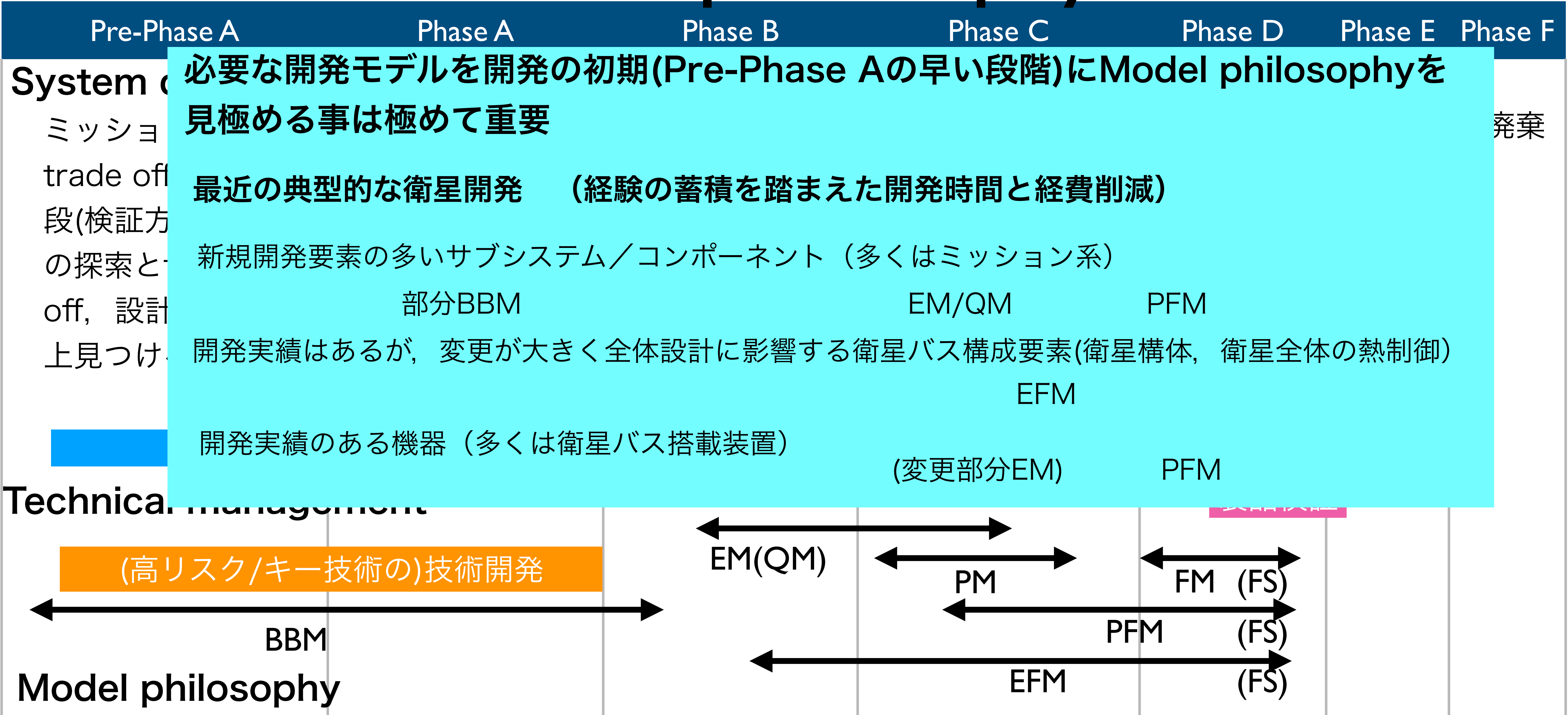
段階的開発と開発フェーズ

NASA式の名前



Model philosophy

NASA式の名前



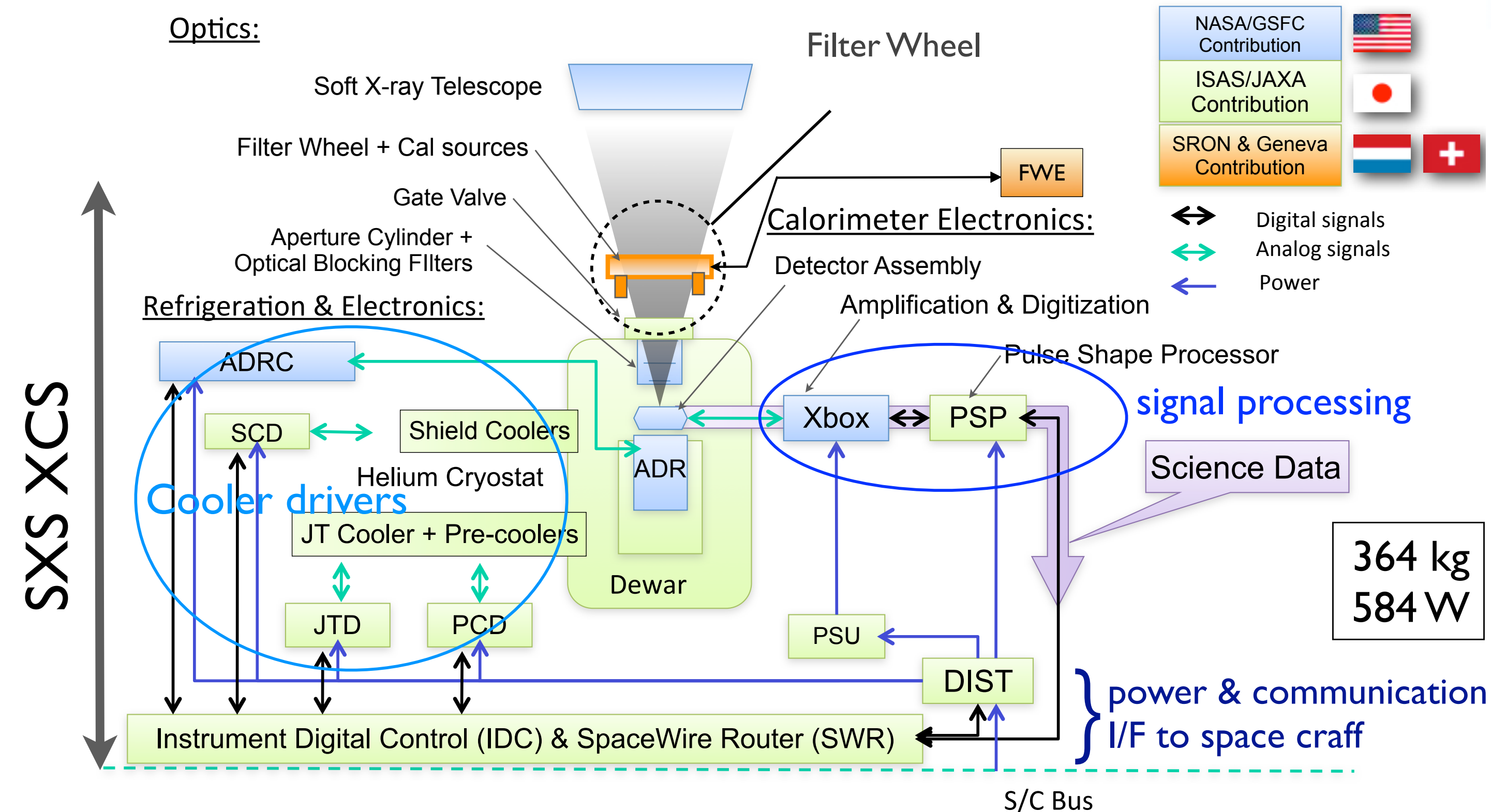
Model philosophyの具体例

ASTRO-H衛星搭載 X線マイクロカロリメータ分光器 (SXS XCS)の場合

SXS system



Development models



Component	Development models		担当
Dewar/CSI	EM	FM	JAXA/NASA
SCD	EM	PFM	JAXA
PCD	EM	PFM	JAXA
JTD	EM	PFM	JAXA
PSP	EM	PFM	JAXA
PSU	EM	FM	JAXA
DIST	-	PFM	JAXA
SWR	EM	PFM	JAXA
ADRC	EM	FM	NASA
XBOX	EM	FM	NASA
FWM	QM	FM	SRON/UNIGE
FWE	EM	PFM	SRON/UNIGE

ASTRO-H

ISAS, Japan Aerospace Exploration Agency

ASTRO-H CDR1, February 8 & 10, 2012

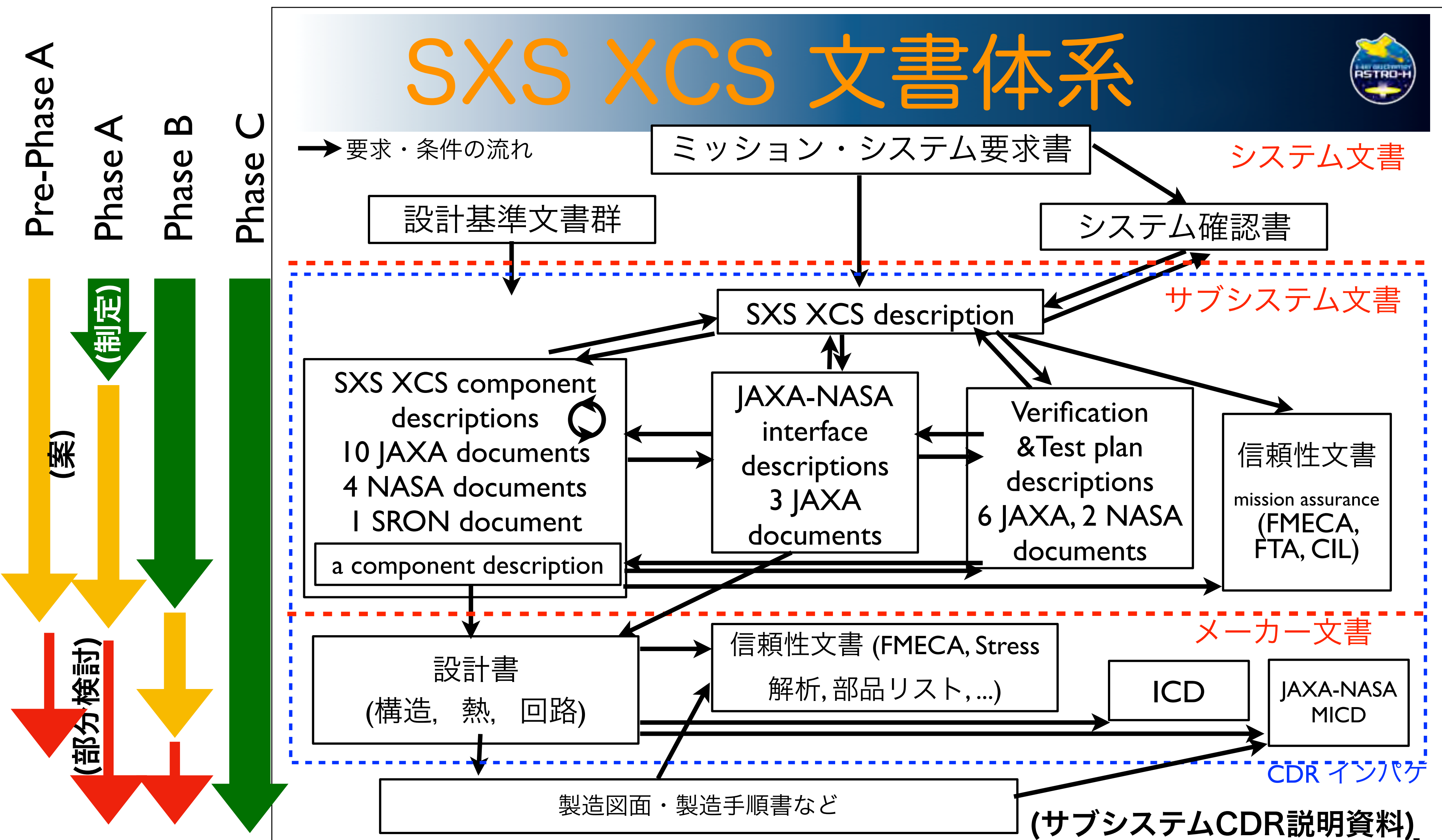
(CDR説明資料)

ASTRO-H

ISAS, Japan Aerospace Exploration Agency

ASTRO-H CDR1, February 8 & 10, 2012

文書からみる V modelと段階的开发 の例



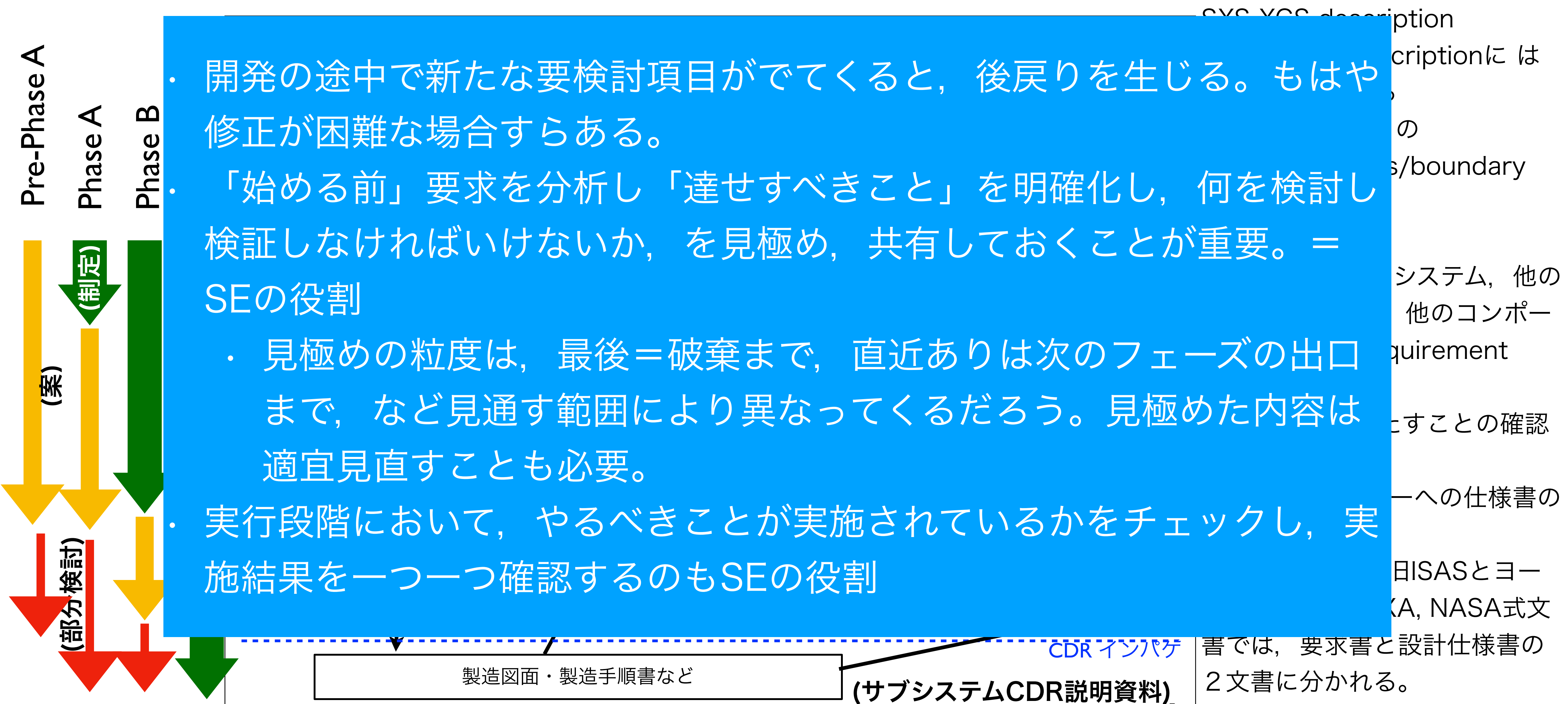
SXS XCS description
component descriptionには
以下が記述される

- (1) 上流/下流からの requirements/boundary conditions
- (2) 上流設計結果
- (3) (2)から生じるシステム, 他のサブシステム, 他のコンポーネントへのrequirement allocations
- (4) (2)が(1)を満たすことの確認

(2) は製造メーカーへの仕様書の位置づけ

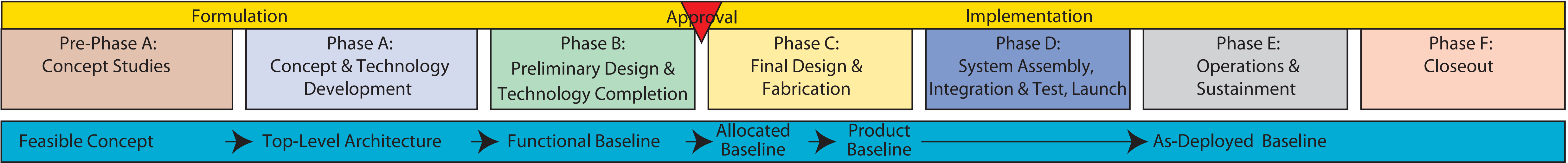
descriptionは, 旧ISASとヨーロッパ方式。JAXA, NASA式文書では, 要求文書(IF要求を含む)と設計仕様書に分かれる。

文書からみる V modelと段階的開発 の例



参考：フェーズの呼び方

NASA



JAXA

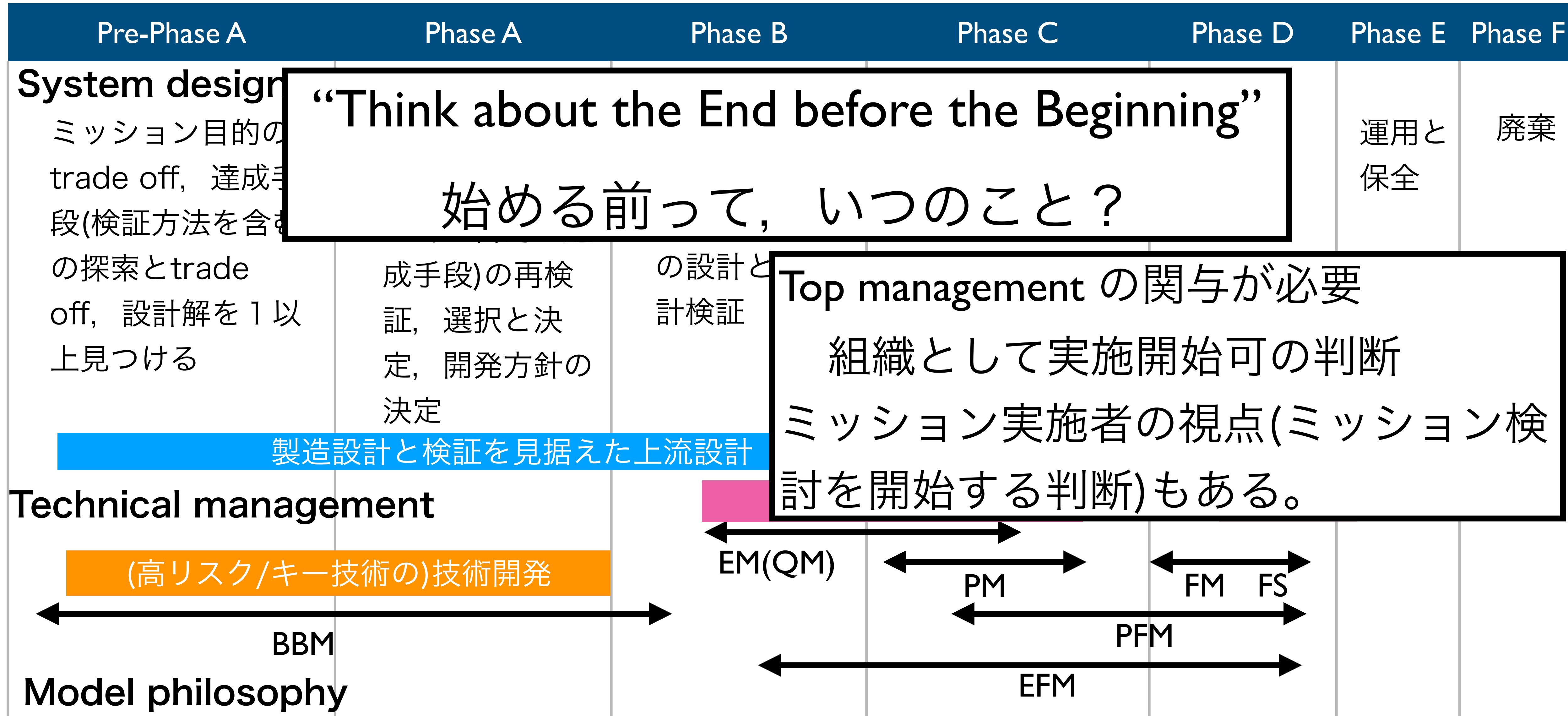


NSF

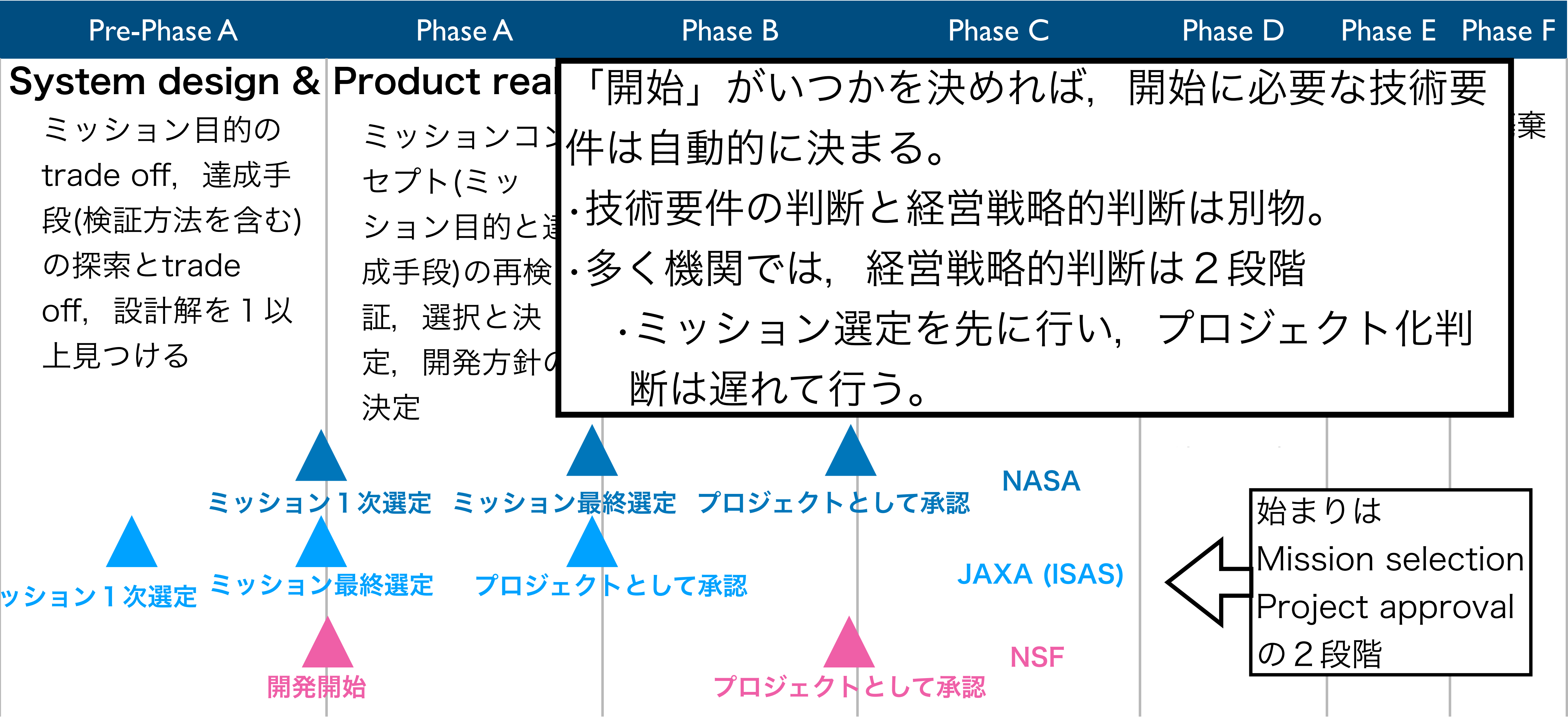


開発の開始

NASA式の名前



開始判断

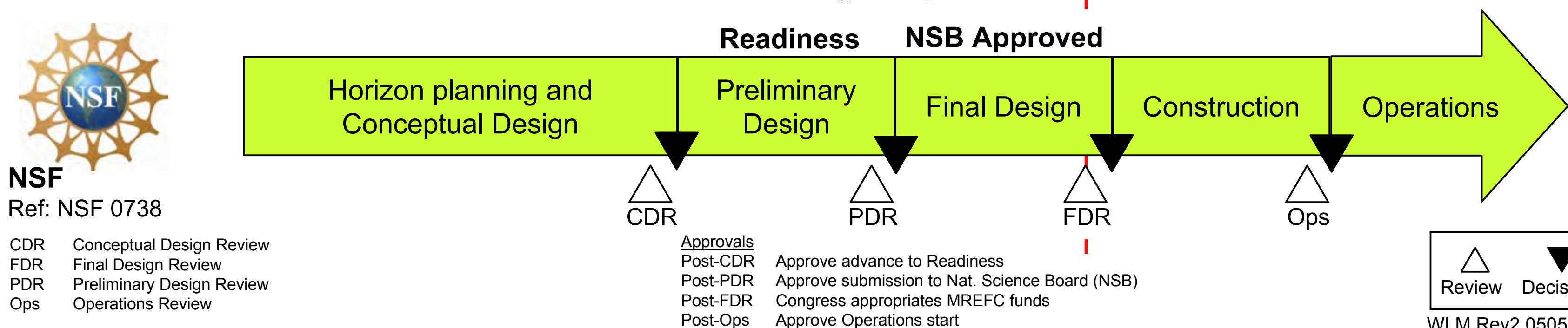
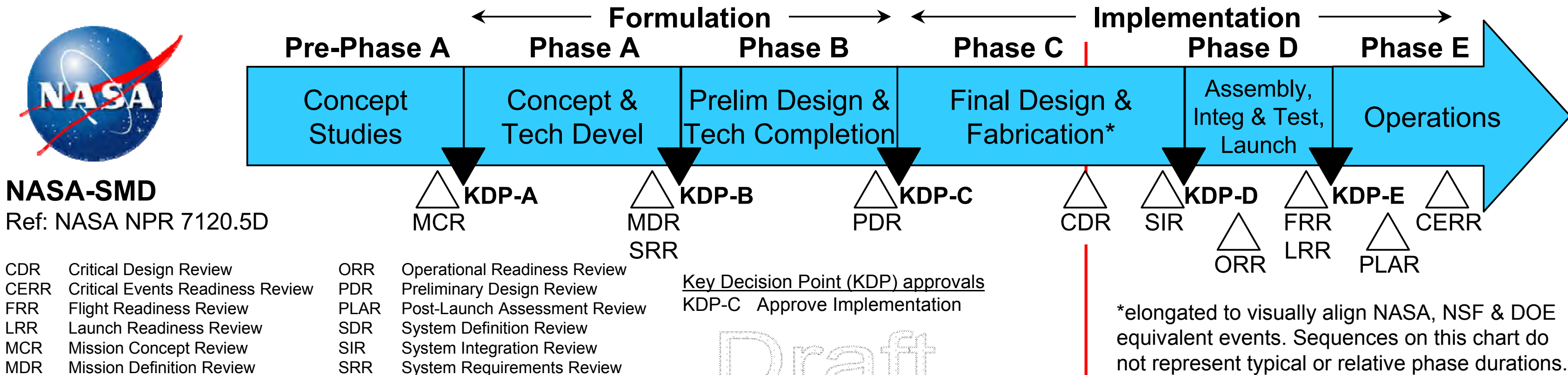
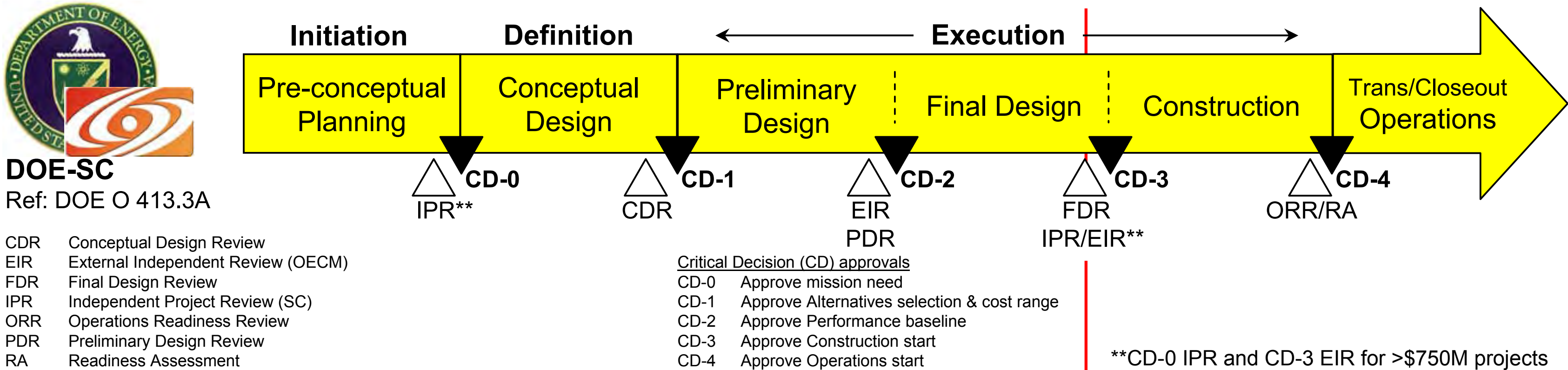


参考：地上プロ
ジェクトを含む
米国

出典
Preconstruction Planning
for Large Science
Infrastructure Projects
by William L Miller, Ph.D.
AAAS S&T Policy Fellow NSF
Large Facilities Office
25june2009

Objectives:
#1 Compare processes and
practices for preconstruction
planning of large science
infrastructure projects, at
NSF, NASA and DOE.

Development process crosswalk: Terminology and alignment



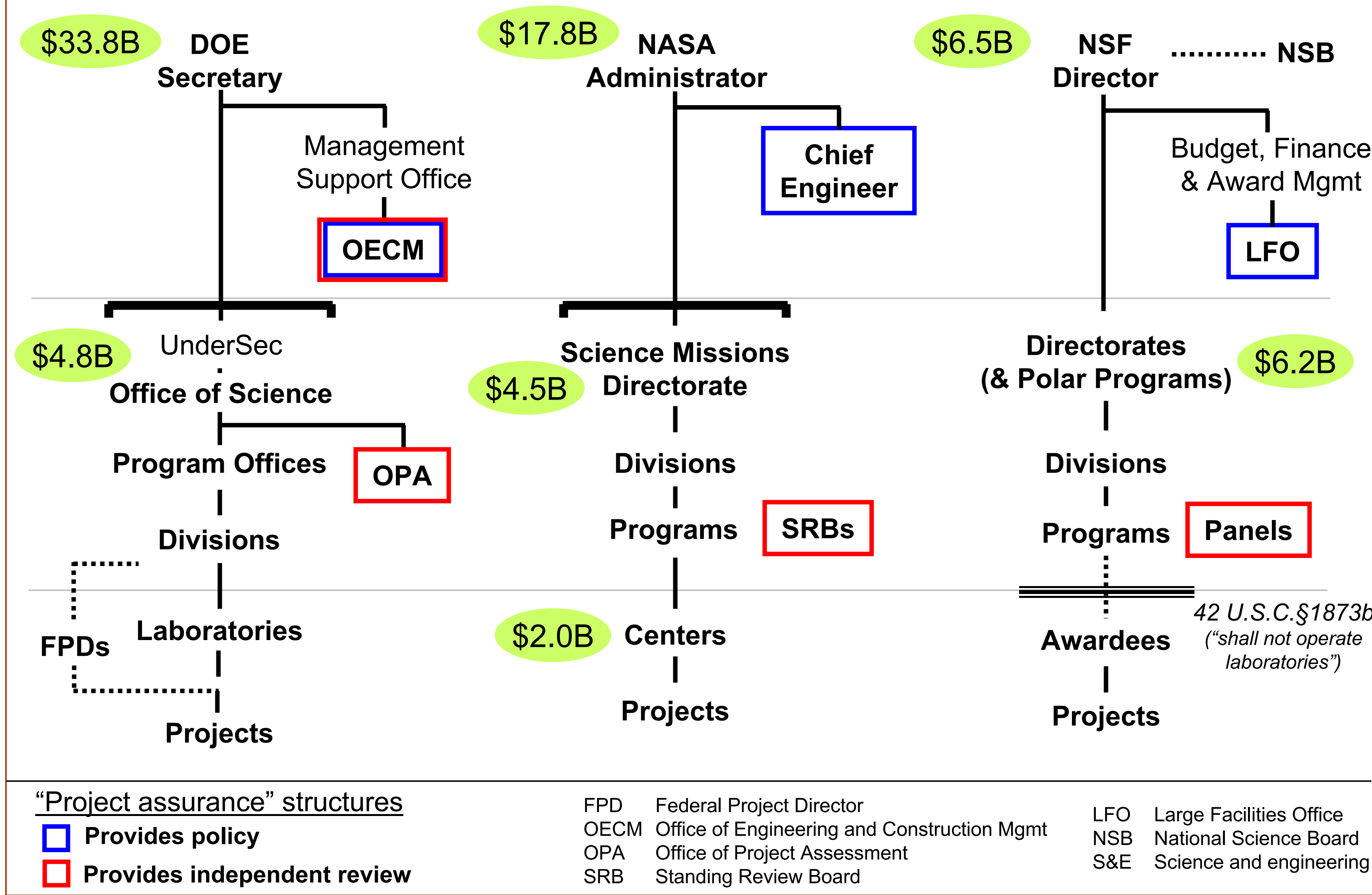
用語定義：Mission, Project, Program

- Mission = 任務や使命
 - Missionは三つの要素を含む
 - (1)到達すべき目標
 - (2)目標に進んでいく行動
 - (3)それらが何かに求められている
(三省堂 World Wise Web)
 - 「**組織のミッション」と言う時は(1)に重点が置かれている。
 - 段階的開発の説明にあるミッションは(1)+(2)の意味。これは(3)も満たすはず。
 - Project
 - A temporally endeavor undertaken to create a unique product, service, or result.
(PMI's PM BOK)
 - Program
 - Related projects, subsidiary programs, and program activities managed in a coordinated manner to obtain benefits not available from managing them individually.
(PMI's PM BOK)
- (Projectは、天文台におけるプロジェクトの定義と異なる)

機関の構造 の例

- Project の上位に program が設定されている。
- 技術審査を行う Review Panelは、プログラムレベルで設定されている。

Comparison: Structural factors



Before the beginning の重要性: 源流主義

- ・ ミッションコンセプトの検討段階では、課題解決の方法に様々な可能性があるが、後のフェーズになるほど選択肢が狭まる。(野田さんのSE研修)
- ・ ミッションコンセプトが悪いと、後から修正は困難。
➡ 良いミッションコンセプトを作ることがミッション成功に最重要。
- ・ Product Assurance における源流主義と同じ考え方。

鈴木さんPA/QA研修の「源流管理」の導入スライド

1.1 入力的重要性

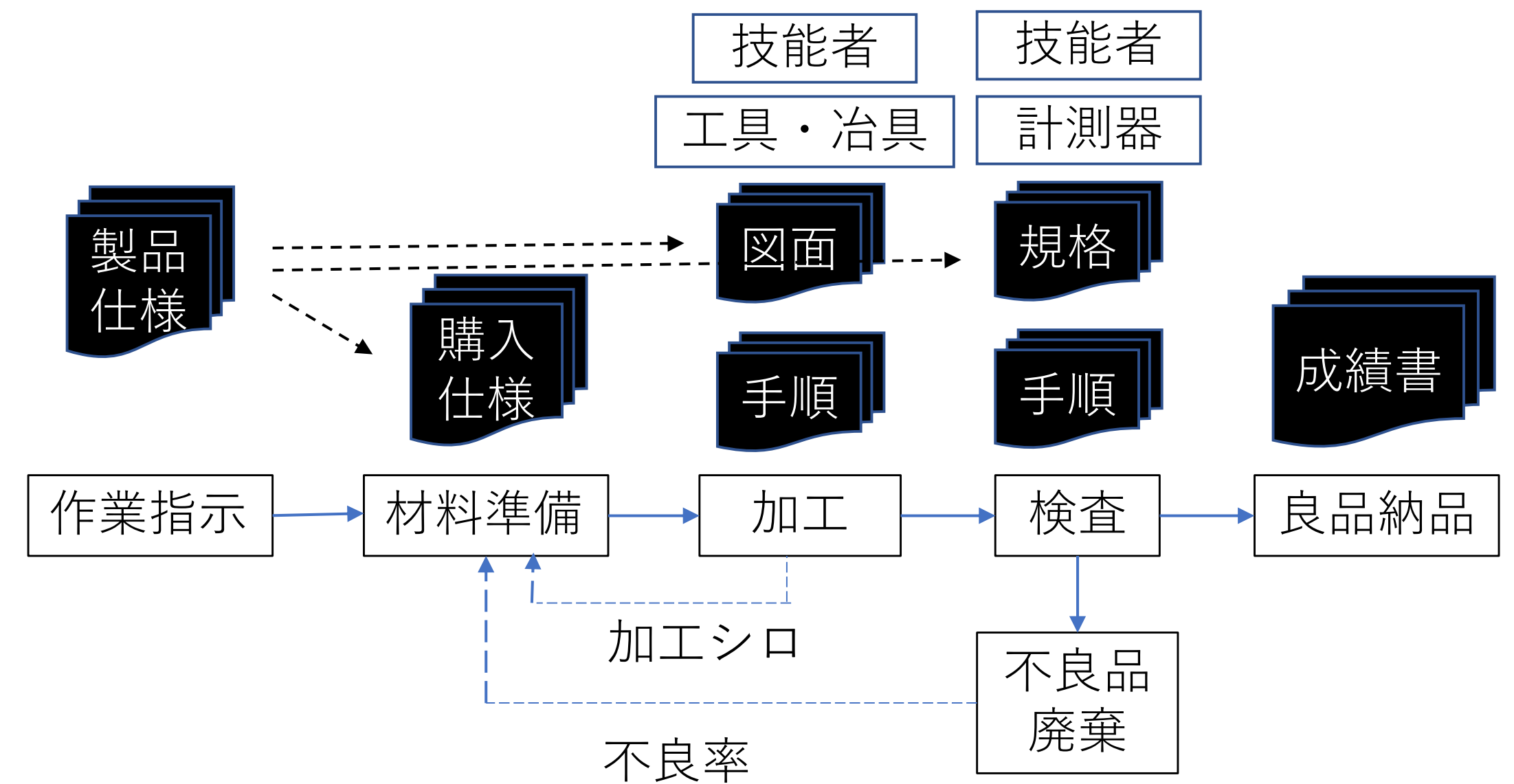


図1-1.2 ロッド加工工程と関連情報

【問】 この作業の起点になっている製品仕様が不正確だと、どうなるのでしょうか？

概念検討段階(Pre-PhaseA)とCML

- Pre-Phase Aではミッションの目的, 達成手段 (アーキテクチャー) に様々な可能性のある状態。次第に可能性を狭めてゆき, 次のフェーズで一つに決定できるところまで, ミッションコンセプトを作りあげる。
- あらゆる可能性を考えて, よい目的, よい実施手段 (技術開発の難易度・リスク, コスト, 開発期間など観点) のよいミッションコンセプトを作る／選ぶ。
- コンセプトの完成度の評価基準として, また, よりよいミッションコンセプトの作るための処方箋として, Cocept Maturity Level (CML) と CML checklist が NASA JPLで考案された。(Wessen+2013)
- JAXAでは2016年にCMLを採用

JAXA (ISAS)におけるCML

CML 1 *Cocktail Napkin* - The science questions have been well articulated, the type of science observations needed for addressing these questions have been proposed, and a rudimentary sketch of the mission concept and high-level objectives have been created. The essence of what makes the idea unique and meaningful have been captured.

注：左はNASA JPLのオリジナルのCML定義。
JAXAの定義もあるが非公開なので、NASAオリジナルで代用した。

CML 2 *Initial Feasibility* – The idea is expanded and questioned on the basis of feasibility, from a science, technical, and programmatic viewpoint. Lower-level objectives have been specified, key performance parameters quantified and basic calculations have been performed. These calculations, to first-order, determine the viability of the concept

CML 3 *Trade Space* - Exploration has been done around the science objectives and architectural trades between the spacecraft system, ground system and mission design to explore impacts on and understand the relationship between science return, cost, and risk

ミッション一次選定合格の要件の一つ
(ISASの規程)

CML 4 *Point Design* – A specific design and cost that returns the desired science has been selected within the trade space and defined down to the level of major subsystems with acceptable margins and reserves. Subsystems trades have been performed.

CML 5 *Baseline Concept* - Implementation approach has been defined including partners, contracting mode, integration and test approach, cost and schedule. This maturity level represents the level needed to write a NASA Step 1 proposal (for competed projects) or hold a Mission Concept Review (for assigned projects)

Pre-Phase A完了の要件の一つ
(JAXAの規程)

CML 6 *Integrated Concept* - Expanded details on the technical, management, cost and other elements of the mission concept have been defined and documented. A NASA Step 2 CSR is at this level of maturity. There is no corresponding milestone for assigned projects

CML 7 *Preliminary Implementation Baseline* - Preliminary system and subsystem level requirements & analyses, demonstrated (& acceptable) margins and reserves, prototyping & technology demonstrations, risk assessments and mitigation plans have been completed. This is the maturity level needed for competed missions to hold their Preliminary Mission System Review (PMSR) and for assigned projects to hold their Mission Definition Review (MDR)

注：NASA MCRは JAXAの MDR に近い。
NASAのPMSRとMDRは、それぞれ、JAXAのSRRとSDRに近い内容である。従って、どちらの場合も、CML5がPre-Phase A出口、CML7 がPhase Aの出口に対応する。

JAXA (ISAS)のCML checklist

- CMLを満たすために何をすればよいのか，何ができている必要があるのか？CMLの文言からだけでは，CMLの中身をよくわかっている人以外はわからない。
- JPLはCMLを活用するためのchecklist を作成した。22のattributes 毎に，CML1-7で満たすべき内容を示している。
- ISASでは，JPL CML checklistをISASのミッションの特性と開発方針にあわせて変更し，CML1-5に対して，21のattributes，150のitems からなるchecklistを作成し，2017年から活用している。

(S.Ueno+2021, Proc. SPIE)

(1) 科学目的，(2) 科学データ，(3) ミッションアーキテクチャー，(4) システムアーキテクチャー，(5) ミッション機器アーキテクチャー，(6) ミッション運用アーキテクチャー，(7) 技術リスクマネジメント計画，(8) 技術マージン維持計画，(9) 技術要素開発，(10) 技術要素ヘリテージ，(11) 搭載機器リスト，(12) システムズエンジニアリング，(13) 打ち上げ手段，(14) planetary protection，(15) 検証計画，(16) 調達マネジメント，(17) 実施体制，(18) スケジュール，(19) WBS，(20) ミッション保証，(21) コスト

天文台ミッションの特性にあわせたchecklistも作成できるはず。

ISAS CML checklistのSE部分

Level (Attribute = システムズエンジニアリング) の内容

- 2 比較対象として検討すべき、コスト・リスク・programaticな課題が異なるミッション実現方法を複数考え、比較対象の第一次案として設定する。
- 3 科学目的の達成度とコスト・リスク・programaticな課題の間のバランスにたって、複数のミッションアーキテクチャー、システムアーキエクチャー、ミッション機器アーキテクチャー、ミッション運用アーキエクチャーについて、優れている点、劣っている点を総合的に判断する。
- 3 (checklist 5-3-2の)ベースラインアーキテクチャーを構成するサブシステムの間の要求の依存関係を分析し同定すること。
- 4 提案ミッションにおいて最低限実現しなければならない最重要な科学outputが明確されており、複数のミッションアーキテクチャー、システムアーキエクチャー、ミッション機器アーキテクチャー、ミッション運用アーキエクチャーの間のトレードスタディが完了していること。
- 5 アーキテクチャのトレードスタディにより採用するミッションアーキテクチャー、システムアーキエクチャー、ミッション機器アーキテクチャー、ミッション運用アーキエクチャーを決定する。
- 5 Phase A以降のシステムズエンジニアリングの方針(Systems Engineering Management Plan) が文書化されている。

CML checklistと科研費の申請書

CML (Attribute = 科学目的) の内容

- 1 該当分野の科学（理学および工学）の大目的の中における提案ミッションの意義を1つの文で記述すること。
- 2 提案ミッションの意義を，過去のミッションや海外を含めた開発中あるいは検討中の関連するミッションと比較可能なレベルにフローダウンし，科学目的として記述すること。
- 3 提案ミッションで実施する実験・観測・分析などを，ミッションの科学目的との関係を明確にして記述すること。

科研費の応募書類

セクション1. 研究目的，研究方法など

(1) 研究課題の核心をなす学術的問い

(2) 本研究の目的

(3) 本研究で何をどのように，どこまで明らかにしようとするのか

両者は同じ意味のことを言っている！
CML checklist は考え方も示している。

おわりに

- Think about the end before the beginning と言われると、先のことはわかるはずはない、とか、end がわかっているならサイエンスではない、という反応が返ってくることもあります。(後者は end をどう定義するかの問題、c.f. 科研費の申請書。)
- しかし、後になって「あの時、どうして、こんなことに気づかなかったんだろう」と思うことはよくあります。SEはこれを避けるために有効な approachの一つです。
- SEが機能するためには、トップマネジメントから実施メンバーに至る全階層で、SEの approach が浸透していることが必要です。
- SEの大枠は組織により異なります。天文台には天文台にあったSEが必要で、それを作ってゆけば、と考えています。