

名古屋大学

「航空機ビジネスプロフェッショナル養成講座」
システムインテグレーションとは何か？

岸 信夫

株式会社SkyDrive
最高技術責任者
2020年11月7日

AGENDA

1. システムインテグレーションとは何か？
2. 航空宇宙分野では、なぜシステムインテグレーションを製品開発の最重要項目として位置づけるのか？
3. システムインテグレーションを実現するために、プログラム&プロジェクトマネジメントやシステムエンジニアリングをどのように活用するか？
4. モジュール型開発とインテグレーション型開発の違い
5. システムインテグレーション能力取得の為のエンジニアリング・アプローチ

1. システムインテグレーションとは？

1. System Integrationとは何か

- System Integration とは、システムへの要求を満足するためにまず、要求を分解して各要素に割り当て、次にその要素をシステムとして適切に統合化することである。この活動はシステムズエンジニアリングの初期の段階から継続的に行われるというのが一般的な説明である。
- 著者の戦闘機、旅客機の開発経験に基づく、System Integration の実際の活動を以下に示す
 - ① Figure1にSystem Integrationの概念を示す。System Integration は能力、形式知と暗黙知及び経験を駆使しながら、要求の分析、機能配分をおこない、制約条件をクリアし、構成要素を有機的に統合し、検証して、システム全体として要求を満たす製品を創り上げるための、擦り合わせの活動である。

1. System Integrationとは何か

- ② 制約条件は、例えば、安全性、重量、容積/空間、環境、コスト、スケジュール、信頼性、整備性である。統合される構成要素は空力、飛行力学、構造、飛行制御、推進、サブシステム、アビオニクスシステム等

- ③ 簡単に言えば、システム統合は、各コンポーネントを「磨き、ブレンドし、適合させる」作業
- ④ 擦り合わせは、Sub-System間、組織間の、品質の高いコミュニケーションを通した情報交換・共有、 討論・検討、決心により達成
- ⑤ コミュニケーション具体的な方策は、その目的に応じた各階層の垂直的、水平的な会議体系、すなわち目的、日程、出席者を定め実行すること

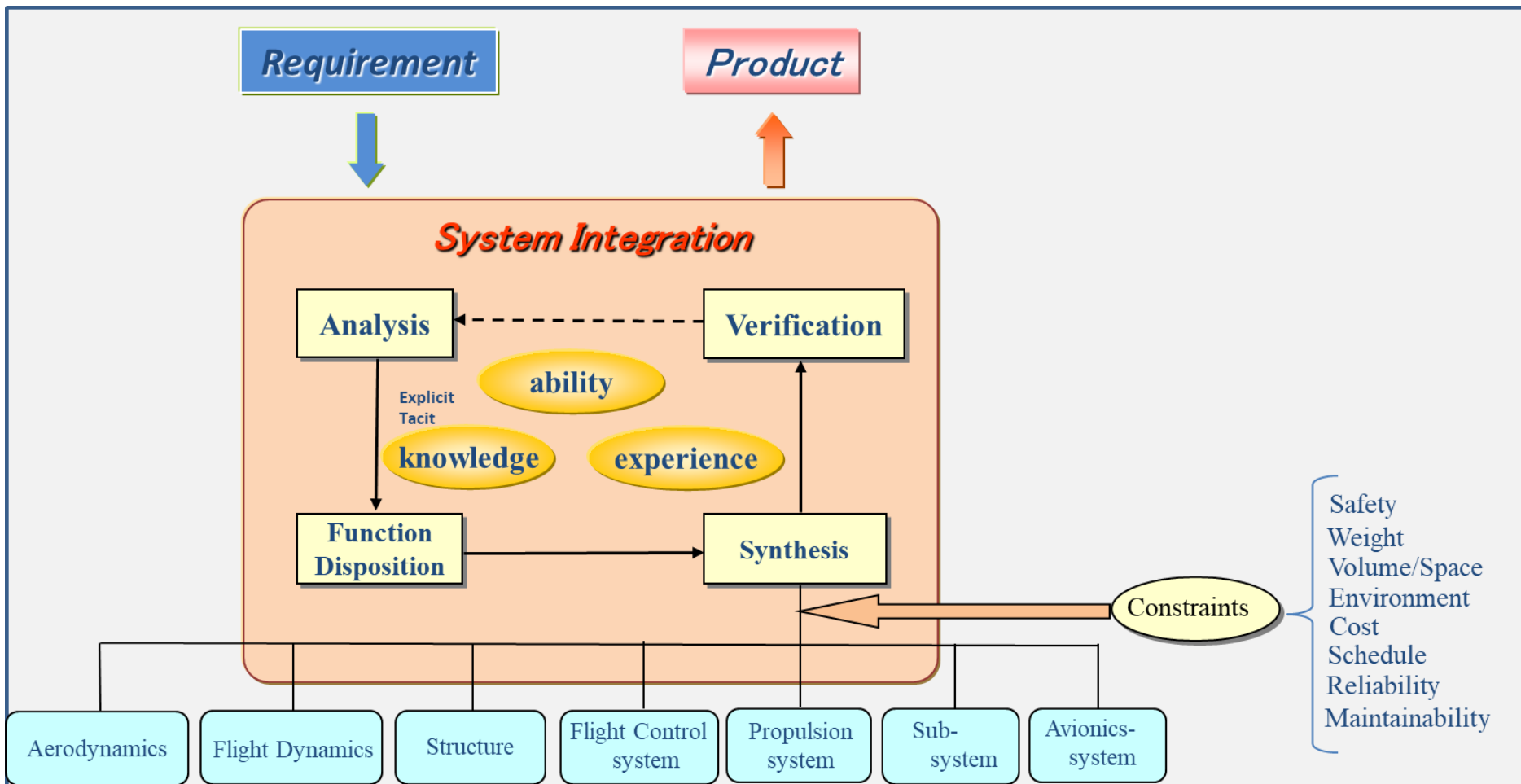


Figure1 System Integration Concept

- 航空機開発分野におけるSystem Integration はMultidisciplinary Design optimization。

いくつかの例をあげる

- ① Aircraft Shape & Inside Components Arrangement
- ② Aircraft & Engine Compatibility
- ③ Engine Performance Optimization
- ④ Software Integration
- ⑤ Integrated Flight Control & Avionics System
- ⑥ Power Generation System
- ⑦ Thermal Management System
- ⑧ Human Factors
- ⑨ Safety Assessment

2. 航空宇宙分野では、なぜシステムインテグレーションを製品開発の最重要項目として位置づけるのか？

2. 航空宇宙分野では、なぜシステムインテグレーションを製品開発の最重要項目として位置づけるのか？

- 東京大学大学院航空宇宙工学専攻の航空宇宙工学の理念に「システム統合化技術の象徴としての航空宇宙工学」として、「航空宇宙の世界では、多分野の工学および理学を統合し、一つの目的を達成するシステムとして組み上げていく技術が特に強く要求されている」(<http://aerospace.t.u-tokyo.ac.jp/org>) とある。
- ここでは、著者の経験した戦闘機開発との比較を念頭に、大規模/複雑/不確実系システムである旅客機の開発での際立った特徴を述べる。
 - ① 高い安全性基準(10^{-9} 件/飛行時間以下)の達成
 - ② 型式証明・安全証明の認証工程の困難さ・複雑さへの対応
 - ③ 長期の開発期間/運用期間中の周辺環境、要求の変化といった不確実性への対処

2. 航空宇宙分野では、なぜシステムインテグレーションを製品開発の最重要項目として位置づけるのか？

- Figure2（ARP4754Aをベースに著者が説明を追記）に示す通り、Validation & Verification (V&V) に沿った、設計と検証のスパイラルな繰返しの開発保証プロセス及び安全性検証のプロセスにより、個々のサブシステムの機能、性能を組み合わせ、擦り合わせることでシステム全体として要求を満足させ、商品として旅客機を完成させることが求められる。

これは単にサブシステム、モジュールを結合するだけでは達成不可能

である。

- 以上を達成するためには System Integrationが必須となる。

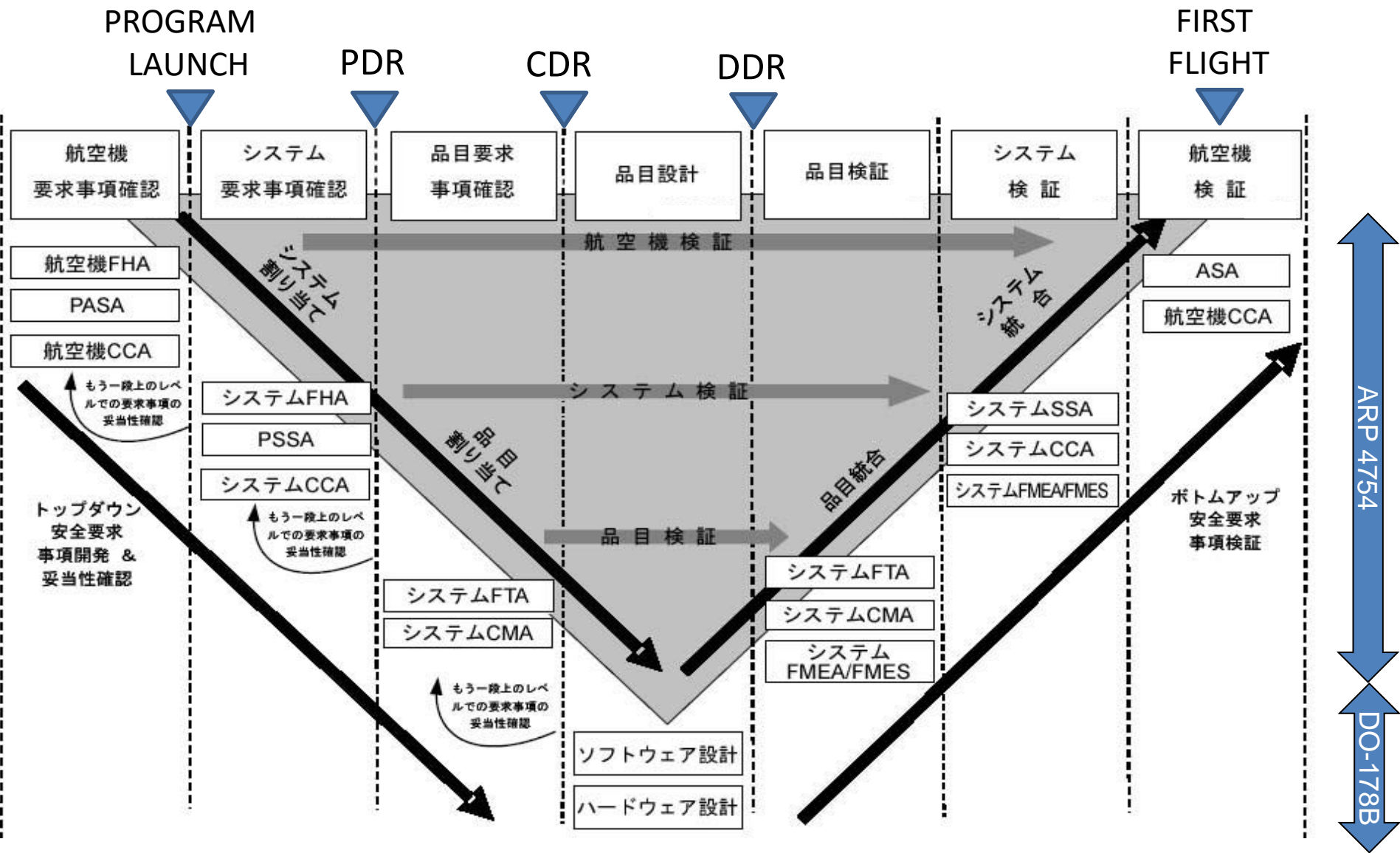


Figure2 Validation & Verification and Safety Assessment Process

3. システムインテグレーションを実現するために
プログラム&プロジェクトマネジメントやシステム
エンジニアリングをどのように活用するか?

- 「旅客機の開発を完了する」ことをProgram & Projectの目標とした時 System Integrationは開発作業そのものである。
- System Integration実現、すなわち目標達成のための組織設計、人材リソース・マネジメント、各種業務プロセス設定などの管理・統制はシステム工学やプロジェクトマネジメントの各種手法を用いることができる。
- Figure3にシステム工学とプロジェクトマネジメントの関係を示す。それぞれの手法については既に多くの手法が研究されている。

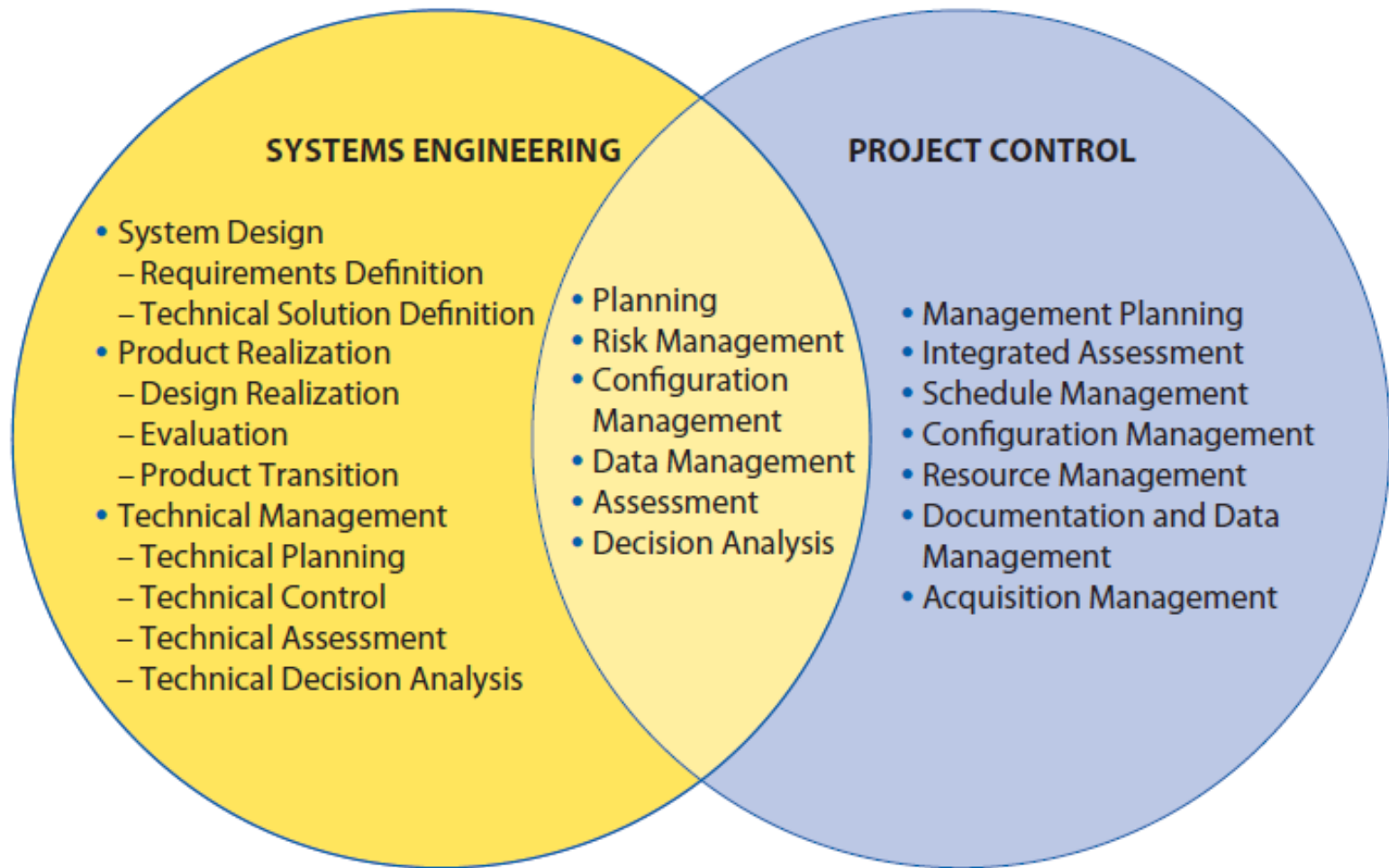


Figure 2.0-1 SE in context of overall project management

1) NASA/SP-2007-6105 Rev1 NASA Systems Engineering Handbookから引用

Figure3 システム工学とプロジェクトマネジメント

- Figure4のスパイラルプロセスはシステムインテグレーションを実現する為のプロセスである。
- これはまさにシステム工学の課題解決のためのプロセスそのものである。

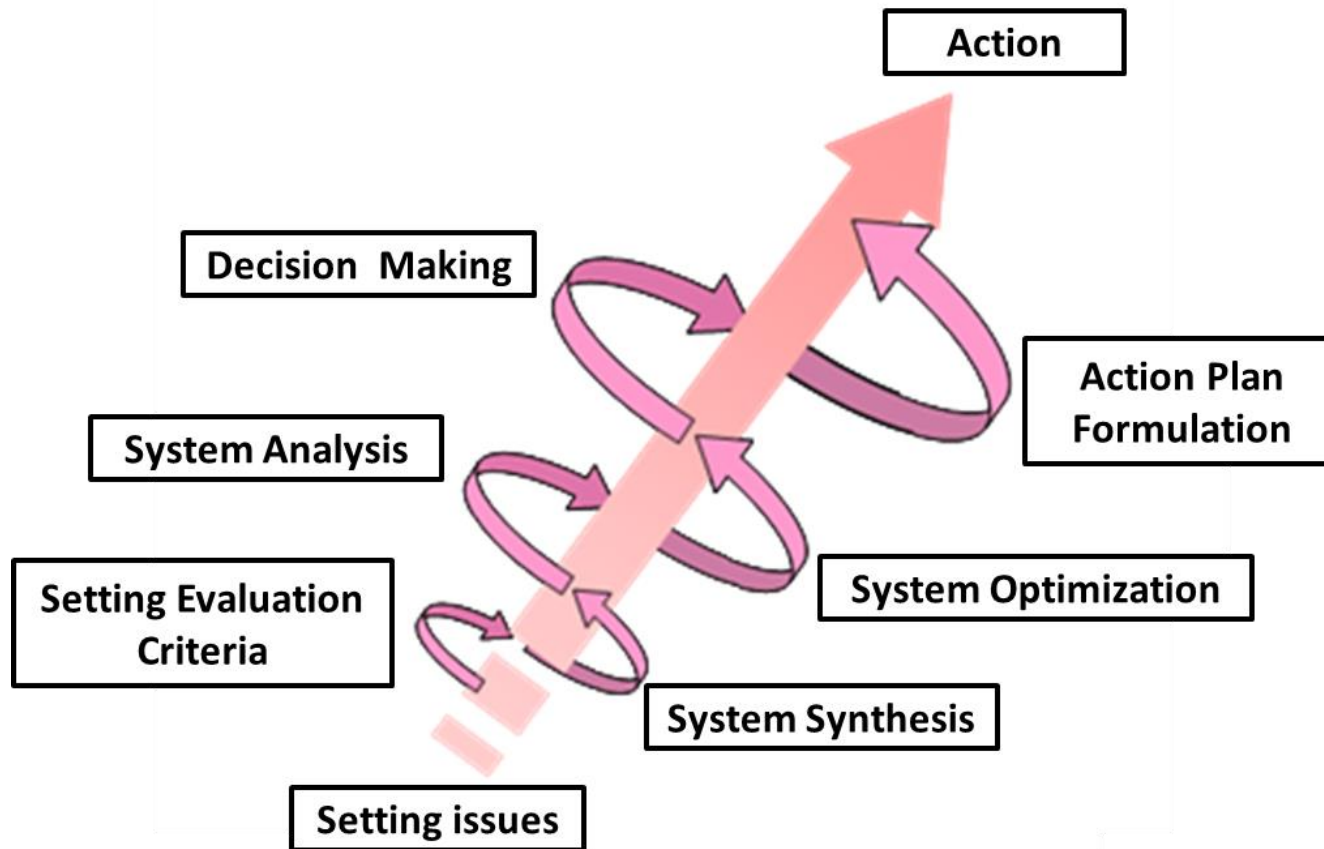


Figure4 システムインテグレーション スパイラルプロセス

➤ 大規模、事業全体、多層的プロジェクト（プログラム）
のインテグレーション

⇒ プログラム・マネジメントにより達成

➤ 開発、製造、CSのプロジェクトのインテグレーション

⇒ プロジェクト・マネジメントにより達成

4. モジュール型開発とインテグレーション型開発の違い

- 狩猟社会、農耕社会、工業社会に続く、情報社会はモジュール構造型の産業組織を前提とするネットワーク経済性を追求。Table1 参照。
- インテグレーション型開発を標榜する航空宇宙産業の対応は？

Table1 新しい経済性－ネットワーク経済性²⁾

	新しい経済性〔ネットワークの経済性〕	
	(Economies of Networks)	対をなす経済性の概念
スケール・メリット	ネットワーク効果 (network effects) －消費者サイド －アウトプット市場	規模の経済性 (economies of scale) －生産者サイド －インプット市場
リソース・メリット	連携の経済性 (economies of alliance) －外部資源 －複数組織 －相乗効果 －革新性 (新結合型)	範囲の経済性 (economies of scope) －内部資源 －同一組織 －費用節約 －ラーニング・バイ・ドゥーイング (改善型)
産業組織	競争的市場 －多数参加・新規参入 －互換性 (代替取引) －モジュール構造	独・寡占市場 －組織の巨大化 －継続性 (長期取引) －統合型 (擦り合わせ) 構造

(資料) 篠崎 (2003) 図 9-1, p. 169 および Adams, et al. (2007), Table 8-1 をもとに作成。

2) 篠崎彰彦, イノベーションの奔流とグローバル経済の発展－過去四半世紀の軌跡と今後予想される変容－
研究・イノベーション学会 研究技術計画Vol.32, No.1, 2017

➤ 部分最適の集合体 = 全体統合 = 性能適合
(≠ 性能最適)

⇒ モジュール型

➤ 部分最適の集合体 ≠ 全体統合
≠ 全体最適

⇒ 最適統合化（調和）活動が必然

⇒ インテグレーション型

➤ モジュール型開発のメリット

① モジュールごとに独立した開発が可能

- ✓ モジュールごとの進化が製品の進化に直結
- ✓ 製品完成後も、モジュール改善で全体機能拡張可能

② 顧客ニーズに合わせた製品をモジュールの組合わせで実現

- ✓ 顧客要求の多様化に低コストで対応可能

③ モジュールごとの分業による低コスト化

- ✓ インタフェース調整の膨大かつ密接な擦り合わせが不要

➤ モジュール型のデメリット

① 最適インタフェース・全体最適とならない

✓ 冗長な部分が残る ⇒ 全体最適ではない

② 既存のインタフェースを変えにくい

✓ インターフェースを変更すると既存のモジュールの利用
不可

✓ インタフェースを変更するとコスト、納期への影響大

③ 大規模複雑系システムでの安全性設計、検証が難し

✓ インテグレーション型と比し、モジュール内に
unknownが残り、安全性証明上の抜け穴ができること
がある

➤B to B の旅客機完成機事業はモジュール型開発へ移行できるのか

Table2 製品ごとの納入・出荷数の比較

	自動車	パソコン	スマートフォン	旅客機
納入・出荷 ³⁾	約1億台 (2017年)	約3億台 (2017年)	約15億台 (2018年)	約2000機 (2018年)

- 旅客機は、エアライン個別要求、安全性基準の高度化への対応が求められる 中量産品（量産品と受注品の中間）であり、製品モジュール化、システムレベルのモジュール化・標準化に限界あり。
完全なモジュール型開発には移行不可

3) 日本航空機開発協会 (JADC) 「主要民間輸送機の受注納入状況」 YGR-9001-1906 2019 1895機
日本自動車工業会 (JAMA) 2017年 世界各国/地域の四輪車生産台数 97299462台

http://www.jama.or.jp/world/world/world_t2.html

日経記事 2018年1月12日 パソコン世界出荷台数2017年 2億5900万台

IDC記事 2019年1月30日 スマートフォン出荷台数2018年 14億490万台

<https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS44826119>

- 旅客機開発のモジュール型への完全移行は困難であるが、自動車に見られるような、モジュール型開発を織込んだインテグレーション型（ハイブリッド型）開発へ移行していくと予想
- また開発プロセスのモジュール(標準)化、一部の装備品、部品単位で志向
- 開発プロセスのモジュール化とは
 - ⇒ 暗黙知の形式知化（System Integration Process/ **Integration Maturity Metrics**、意思決定プロセスの導入）
Table3
 - ⇒ ツールの高度化（設計最適化ツール、安全性解析ツールなど）
- 一方、低コスト、短期間開発を目指す **e-VTOL機開発**では既存品の最大活用が求められ、アイテム（コンポーネント）レベルでのモジュール開発（アジャイル開発）の採用が大いに期待される。

Table 3 TRL, IRLとSRLの比較

レベル	TRL ; Technology Readiness Level ⁴⁾	IRL ; Integration Readiness Level ⁴⁾	SRL ; System Readiness Level ⁵⁾
1	基本原理の観察、報告	技術間のインターフェイス特性の、十分な詳細さでの識別	【コンセプトの洗練化】 システム/技術開発戦略の初期コンセプト概念の洗練化 □
2	技術のコンセプトやアプリケーションの明文化	インタフェースを通じた技術間の相互作用を特徴付ける、特異性のある程度の識別	【技術の開発】 技術のリスクの低減、全体システムに統合する適切な技術の決定 □
3	解析及び実験による、技術概念のクリティカル機能や特徴の立証	整然と効率的に統合、相互作用するための技術間の適合性	【システム開発とデモンストレーション】 システムの開発または能力の増強、インテグレーションと製造のリスクの低減、運航のサポート性の確保、物流拠点のを削減、人間系のインテグレーションの実行、生産性のための設計、クリティカルな事業情報の取得と保護、システムインテグレーション、相互運航性、安全性、ユーティリティのデモンストレーション
4	実験室環境での、構成品や一部の部品の検証	技術間の統合についての十分に詳細な品質保証	【生産と開発】 ミッション要求を満たす運用能力の実現
5	想定する使用環境での、構成品やその一部の検証	インテグレーションの確立、管理、終了に必要な技術間の十分な統制	【運用とサポート】 運用サポートのパフォーマンス要件を満たし、システムをそのライフサイクル全体で最も費用対効果の高い方法で維持するサポートプログラムの実行
6	想定する使用環境での、システム／サブシステムモデルのデモンストレーション	意図したアプリケーションの情報の把握、咀嚼、構造化による技術の統合	
7	想定する使用環境での、試作システムのデモンストレーション	実用的なものとするために、十分詳細に検証(V & V)された技術のインテグレーション	
8	試験及びデモンストレーションによる、実装システムの完成、認定	システムの使用環境での試験とデモンストレーションによる、実インテグレーション完了とミッションの認定	
9	実運用ミッションを通しての、実装システムの証明	実運用ミッションを通しての、インテグレーションの証明	

- 4) Sauser, B., Gove, R., Forbes, E. and Emmanuel Ramirez-Marquez, J., “ Integration maturity metrics: Development of an integration readiness level “, Information Knowledge Systems Management 9 (2010) 17-46, DOI 10.3233/IKS-2010-0133, IOS Press
- 5) Sauser, B., Verma, D., Ramirez-Marquez, J., Gove, R., “ From TRL to SRL: The concept of System Readiness Levels ”, Conference on Systems Engineering Research (CSER), Los Angeles, CA USA, 2006.

6. システムインテグレーション能力取得の為の工学的 アプローチ

System Integration能力獲得のためには以下の工学的アプローチが必須と考えられる。

- プログラム・マネジメントとプロジェクト・マネジメント
(Project Management Body of Knowledge (PMBOK) 他)
- システム工学
- 航空機設計教育
- 設計最適化手法 (Multidisciplinary Design Optimization(MDO))
- 安全性・信頼性解析手法 (System Theoretic Accident Model and Processes (STAMP) 他)
- 実開発作業への参画 (インターンシップ)

➤ 新たな安全性解析手法

FTA, FMEA (従来手法) (Figure5 参照):

構成要素の故障が事故を引き起こすと考え、その故障を最小化する信頼性工学的手法

STAMP⁶⁾ : Systems- Theoretic Accident Model and Processes

MITのNancy Leveson教授が提唱する、システム理論に基づく新しい安全性分析方法論

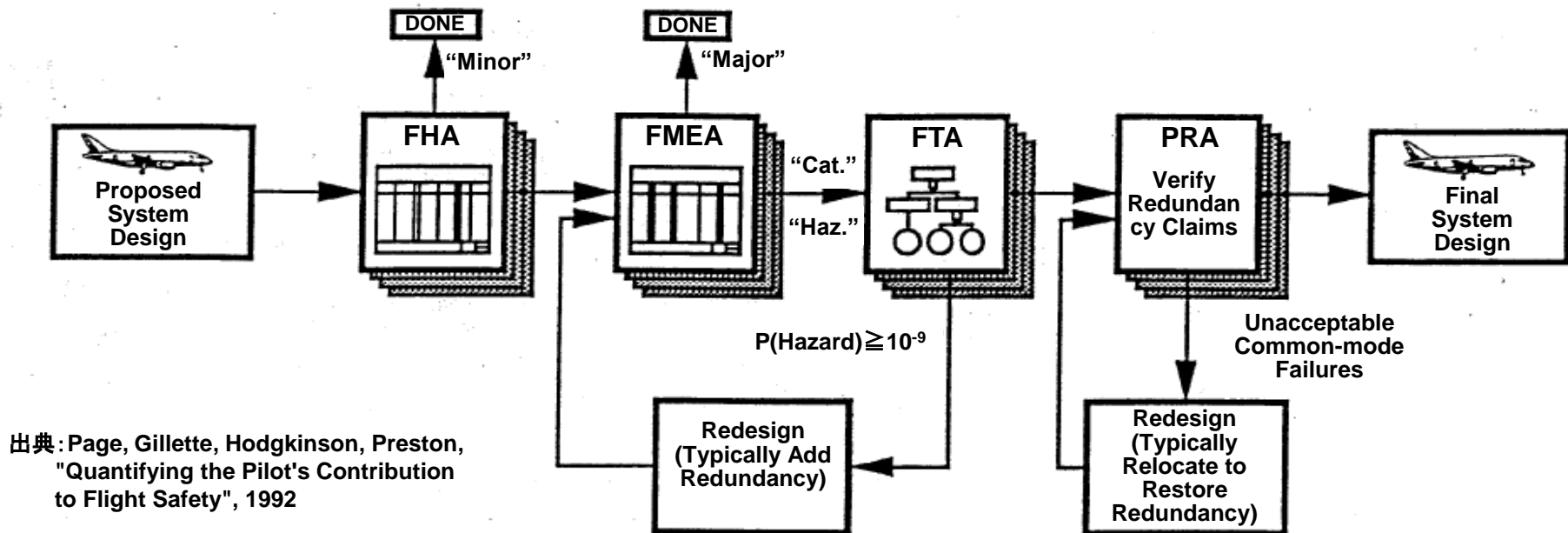
STPA : System-Theoretic Process Analysis

システムのハザード要因を分析する新しい安全解析手法

故障を低減するという信頼性工学的手法ではなく、安全を確保するための制御行動とそのフィードバックという情報が動的に伝達されるシステムの中で事故が起こるというモデルに基づく。概念図をFigure6に示す。

Note: STAMPは解析モデル・手法の考え方(理論), STPAはその考え方をを用いた解析方法を示す。

6) Leveson, Nancy G., "A New Accident Model for Engineering Safer Systems," Safety Science, Vol. 42, No. 4, pp. 237-270, April 2004.



- **FHA : Functional Hazard Analysis**
 - ✓ 機能上の異常事象を抽出して、機体に及ぼす影響と致命度を評価し、信頼度要求を設定
- **FMEA : Failure Mode and Effect Analysis**
 - ✓ 構成要素の故障モードを洗い出し、機体への影響を評価（ボトムアップ手法）
- **FTA : Fault Tree Analysis**
 - ✓ FHA/FMEAで抽出された異常事象のうち、影響度が“Hazardous”以上のアイテムに対しFault Treeを作成し、発生確率を算出（トップダウン手法）
- **PRA : Particular Risk Analysis 【CCA : Common Cause Analysisの一部】**
 - ✓ 1つの要因により複数の機能が同時に喪失しないことを確認

Figure5 安全性評価プロセス

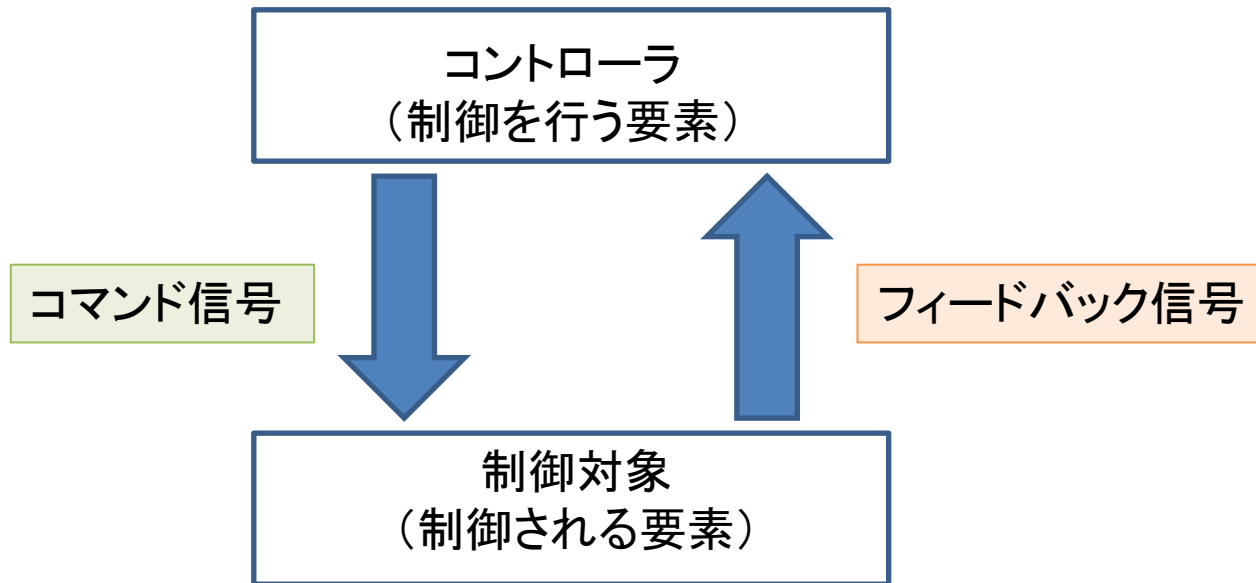


Figure6 STAMPにおける相互作用のモデル