



宇宙理工学概論（２）

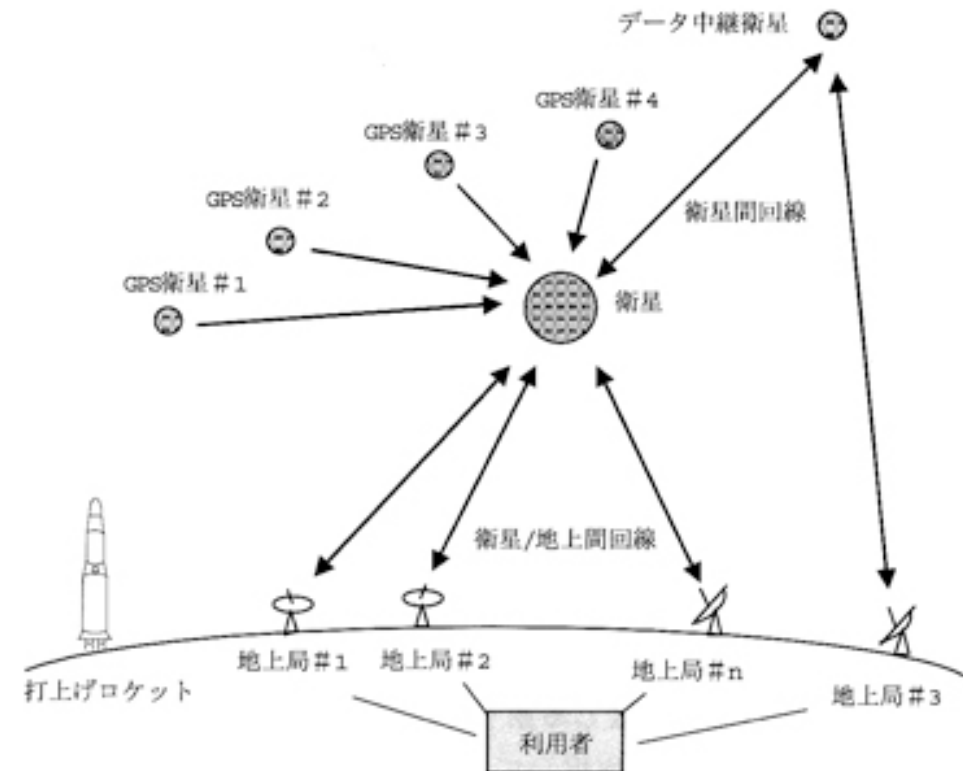
衛星設計に見るシステム設計技術



電気工学専攻・宇宙理工学コース長
木村真一

宇宙利用システム

- 人工衛星は人工衛星だけで存在しているのではない！！
- 人工衛星はさまざまな
周辺の設備を含めた
システムの一部として
初めて機能する
- 衛星の機能は当然
システムの制約を受ける
- 衛星ミッションを実現
するためには、システム
全体を考える必要がある



人工衛星や衛星搭載機器のような 複雑で分けわからないものを どうやって作ればいいの？



人間の特性

人間はいつも大きいことがわからないと
小さいことがわからない

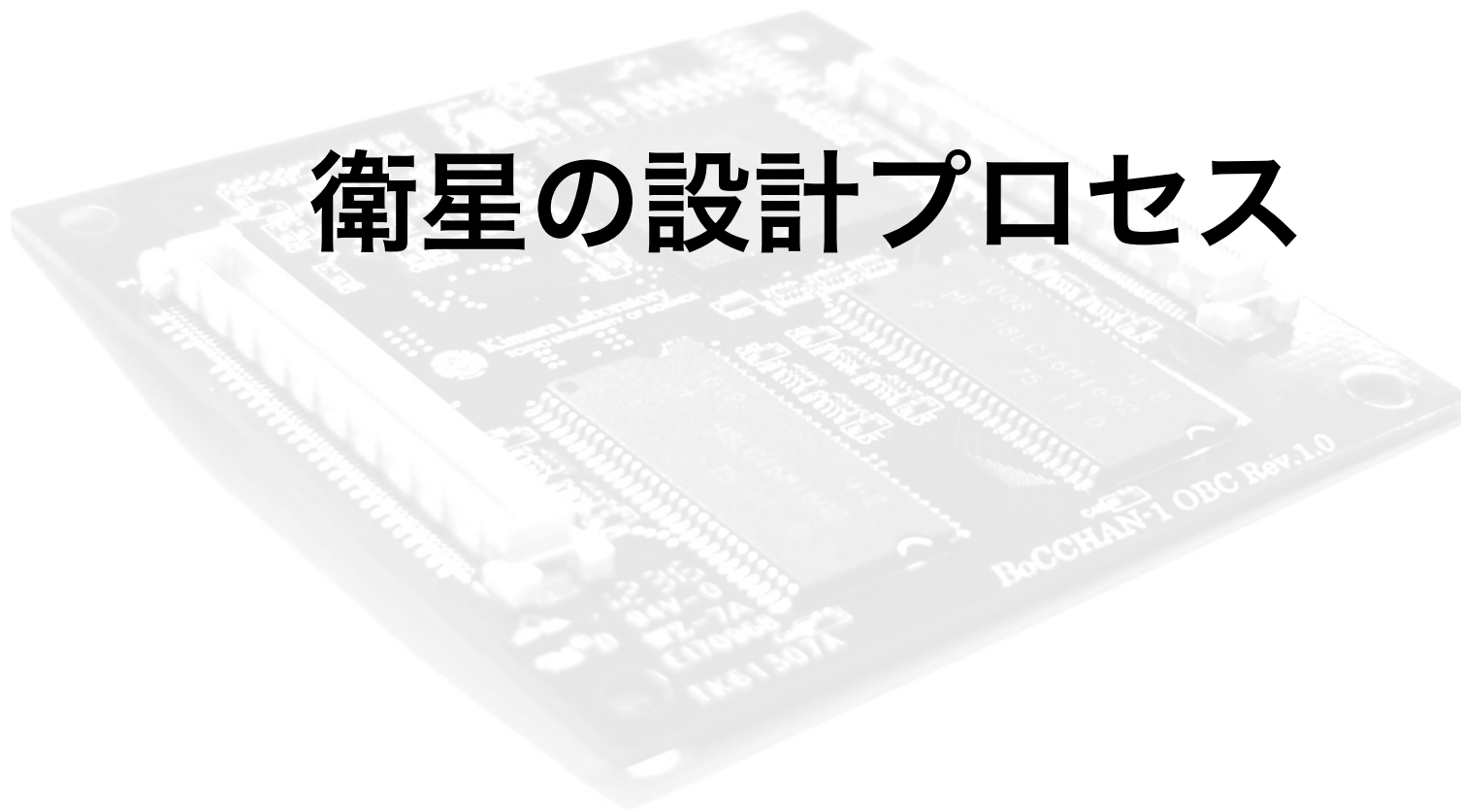
いくつかのことをやらなきゃいけないか
わからないと心配になる

だから

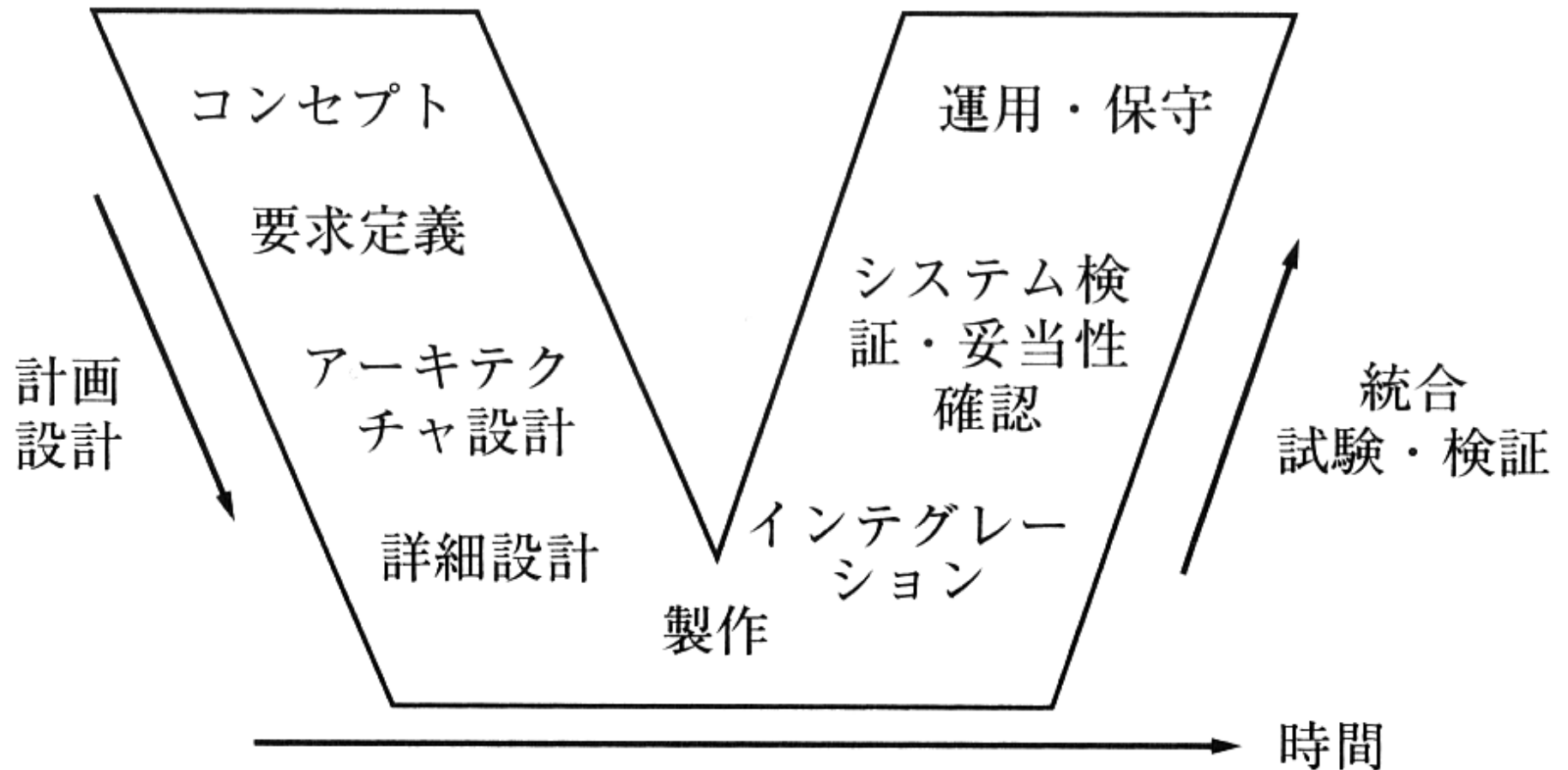
物事を考えるときは
大きいことから、
小さいことへ順番に考える

いくつかのことを並列にやるときには
必ずやることを数え上げる

衛星の設計プロセス



V字プロセス





システム設計の概要と要求分析

**衛星（システム）を考える順番
まずやりたいことを決めよう。**

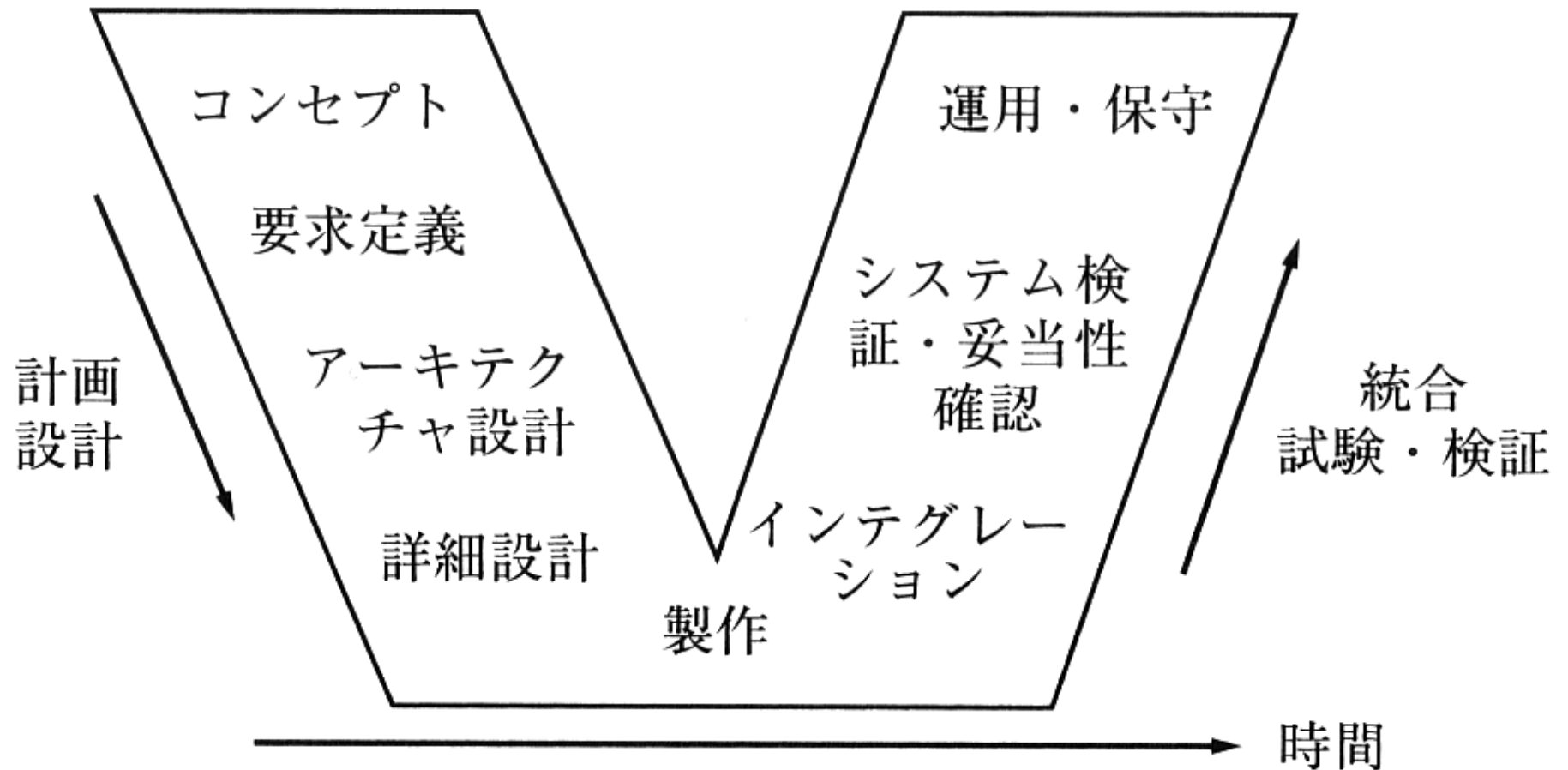


まずは要求分析

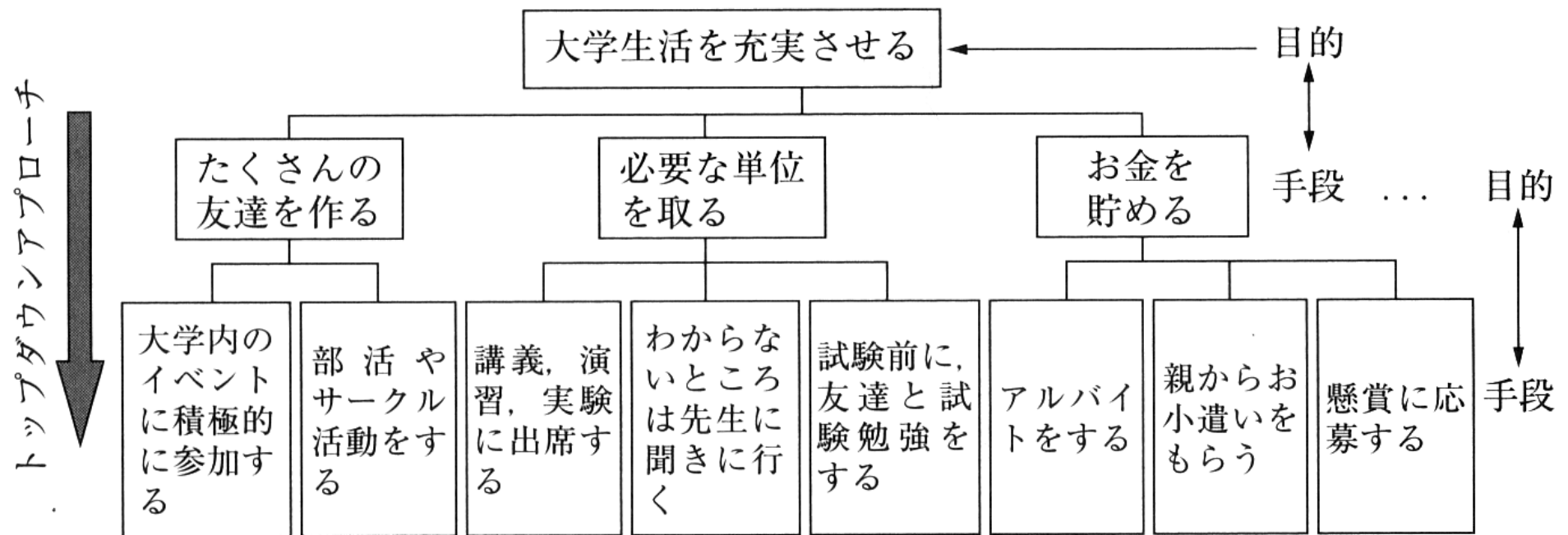
みんなこの衛星で何したい？

それができるようにするには
どうしたらいい？

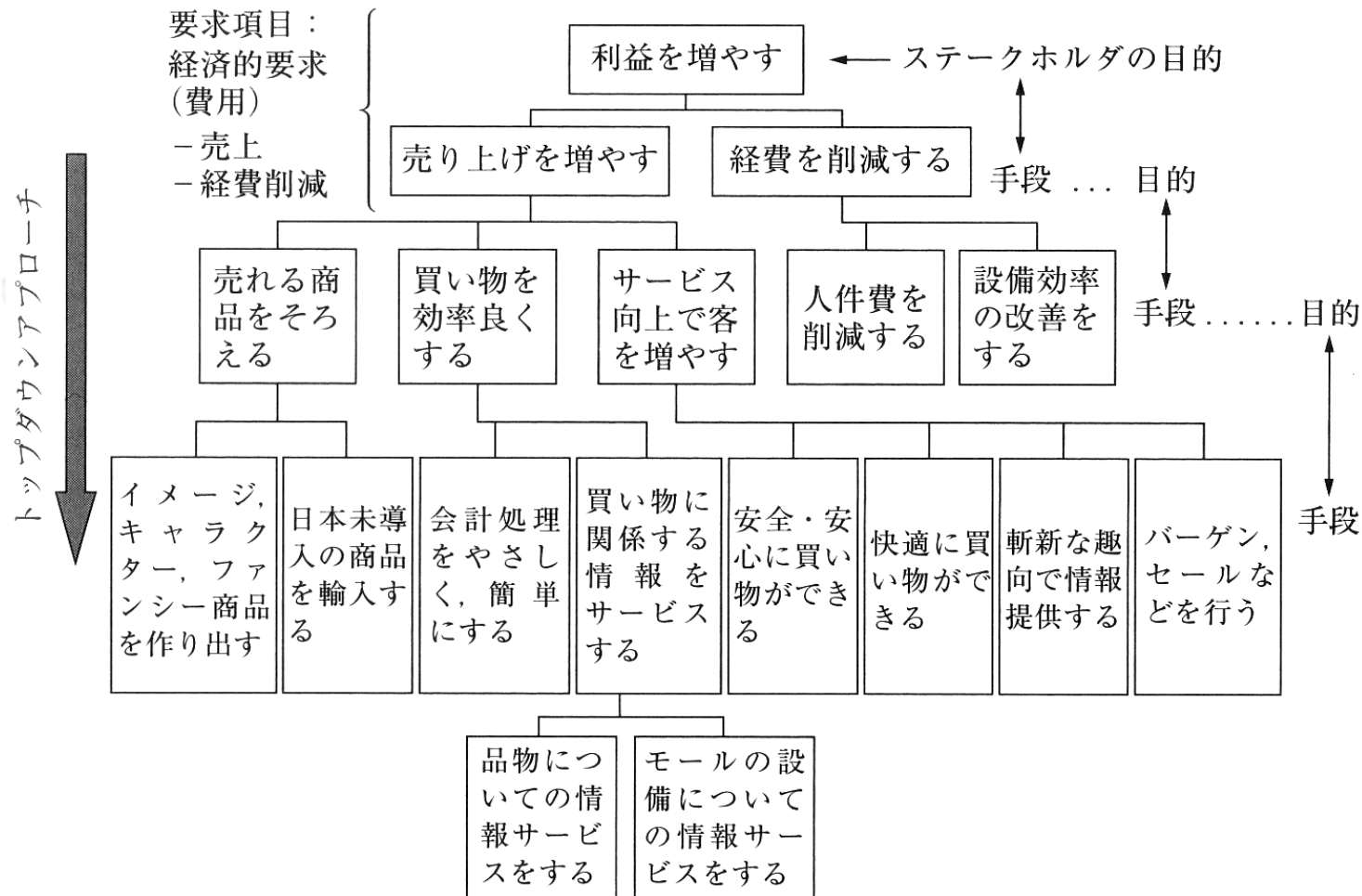
V字プロセス



要求分析



要求分析

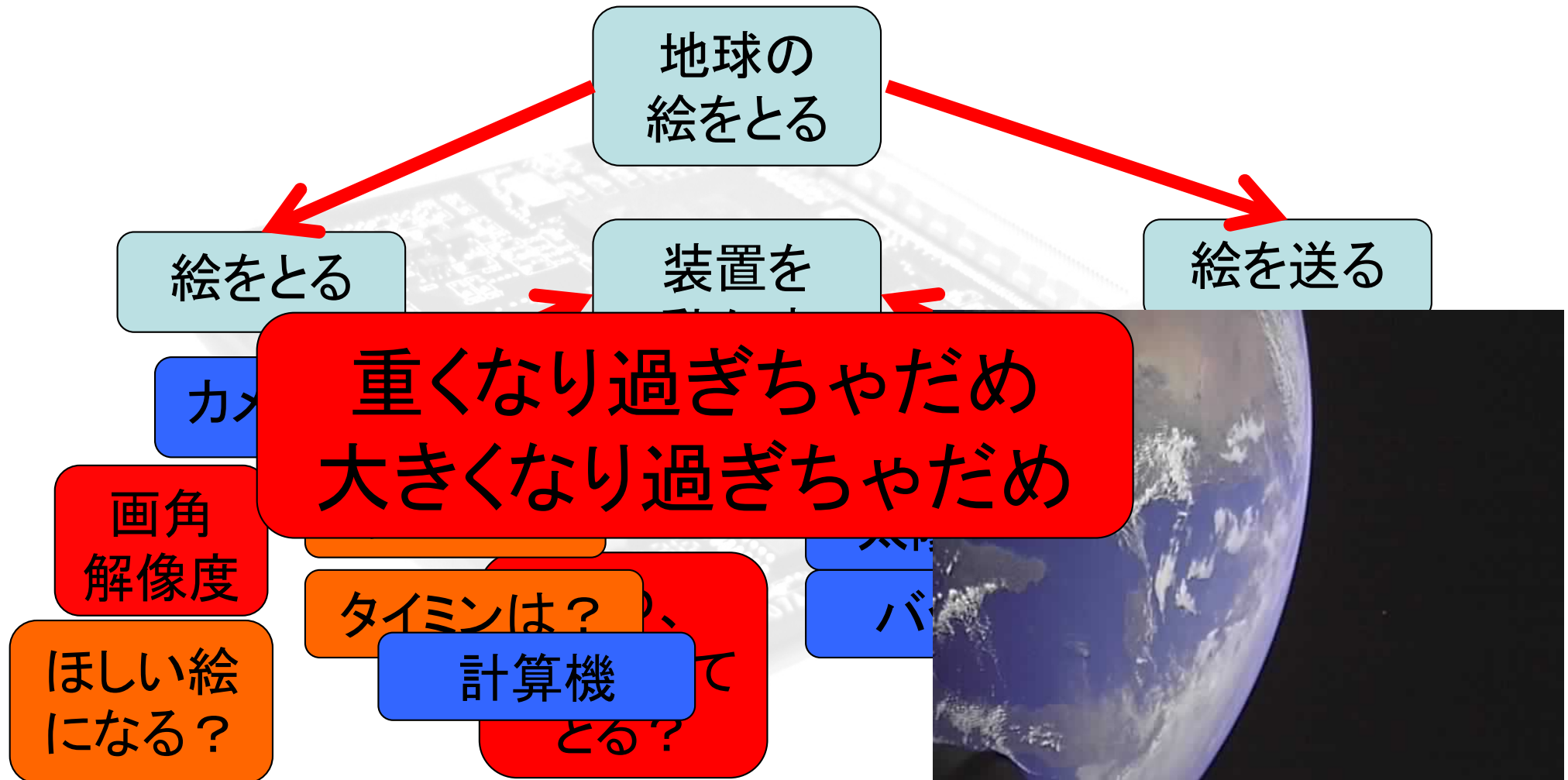




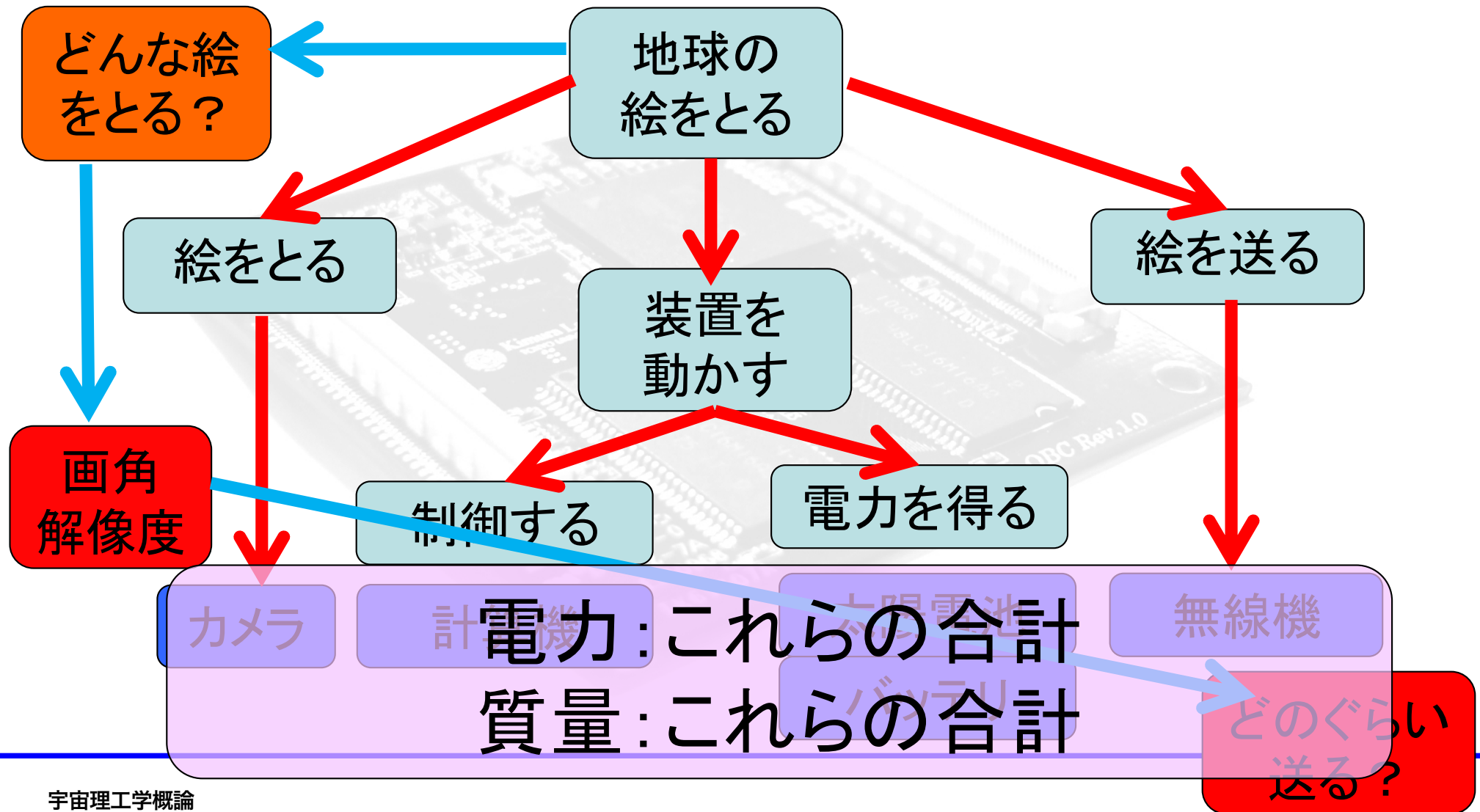
制約条件の下で 最適な組み合わせを考える

- 衛星はそれだけで機能するのではなく、打ち上げ、軌道、地上局を含めたシステムとして機能する。
- 制約条件：リソース
 - サイズ、質量、電力
 - 通信容量、計算能力、視野、アライメント
- 軌道
 - 地球との距離・軌道周期
 - 通信容量・通信時間
 - 環境条件（熱、電力、放射線）、打ち上げ手段
- コンフィギュレーション
 - 機器構成、形状

具体的に「地球の絵をとる」で考えてみよう

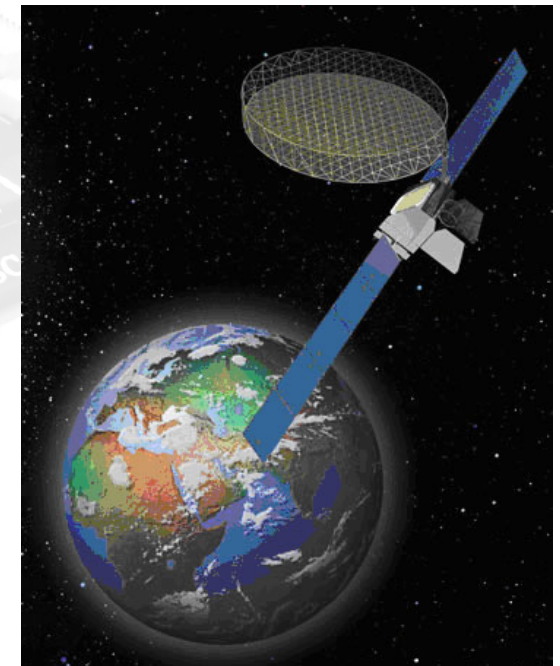
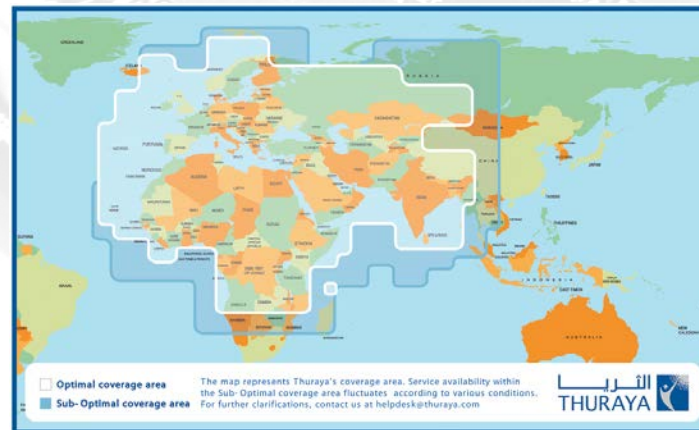


具体的に「地球の絵をとる」で考えてみよう



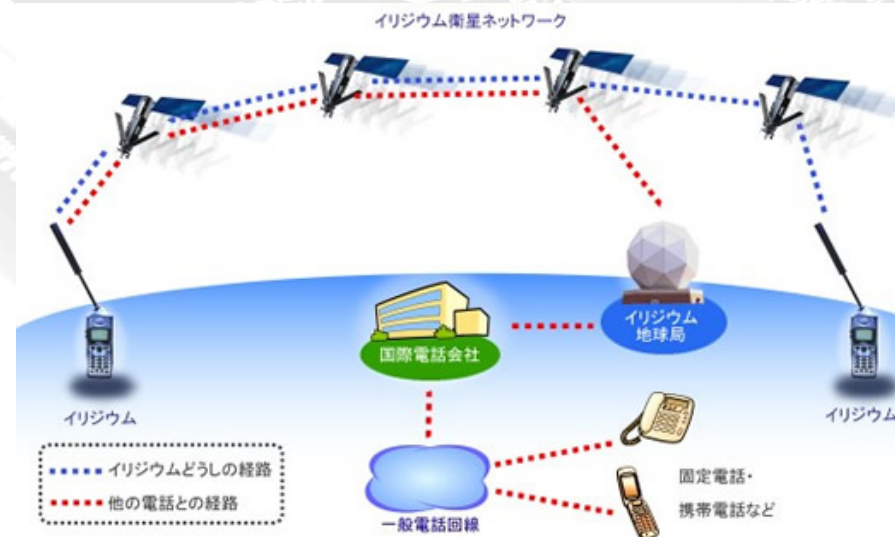
答えは一つじゃない Thuraya

- ・ アラブ首長国連邦が1997年に投資する事で実現
- ・ 現在3機の衛星を運用中、いずれもアラブ首長国連邦所有
- ・ 製造：Boeing Satellite Systems(Hughes)
- ・ 直径12mの展開型アンテナを搭載
- ・ サービス：衛星携帯電話

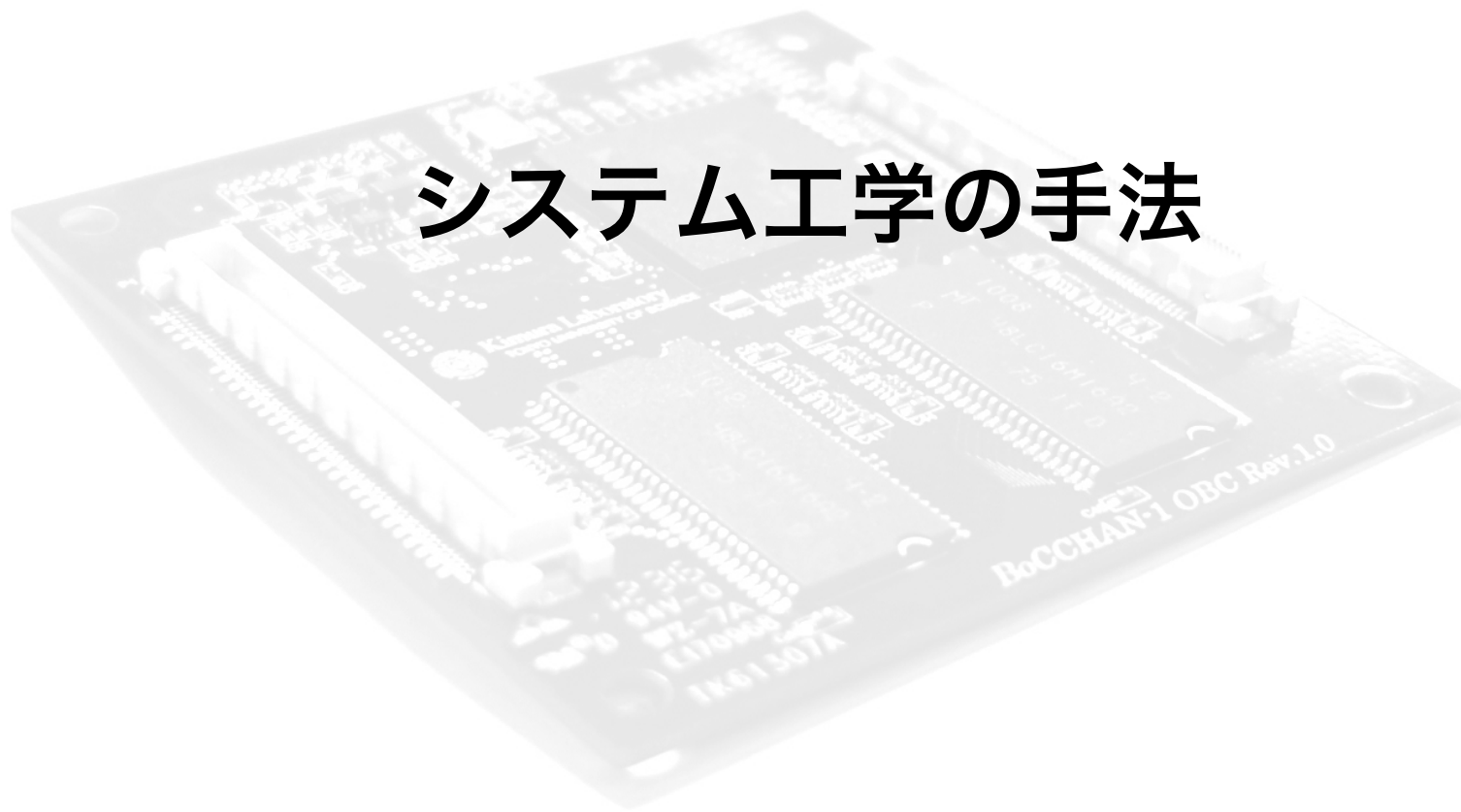


答えは一つじゃない Iridium

- ・ ミッション：
 - 66個の衛星コンステレーションを用いた全地球通信サービス
- ・ 軌道：
 - 高度780 km、傾斜角86.4度
- ・ 質量：
 - 689 kg



システム工学の手法








意思決定法

**AにするかBにするか
迷ったらどうするか**

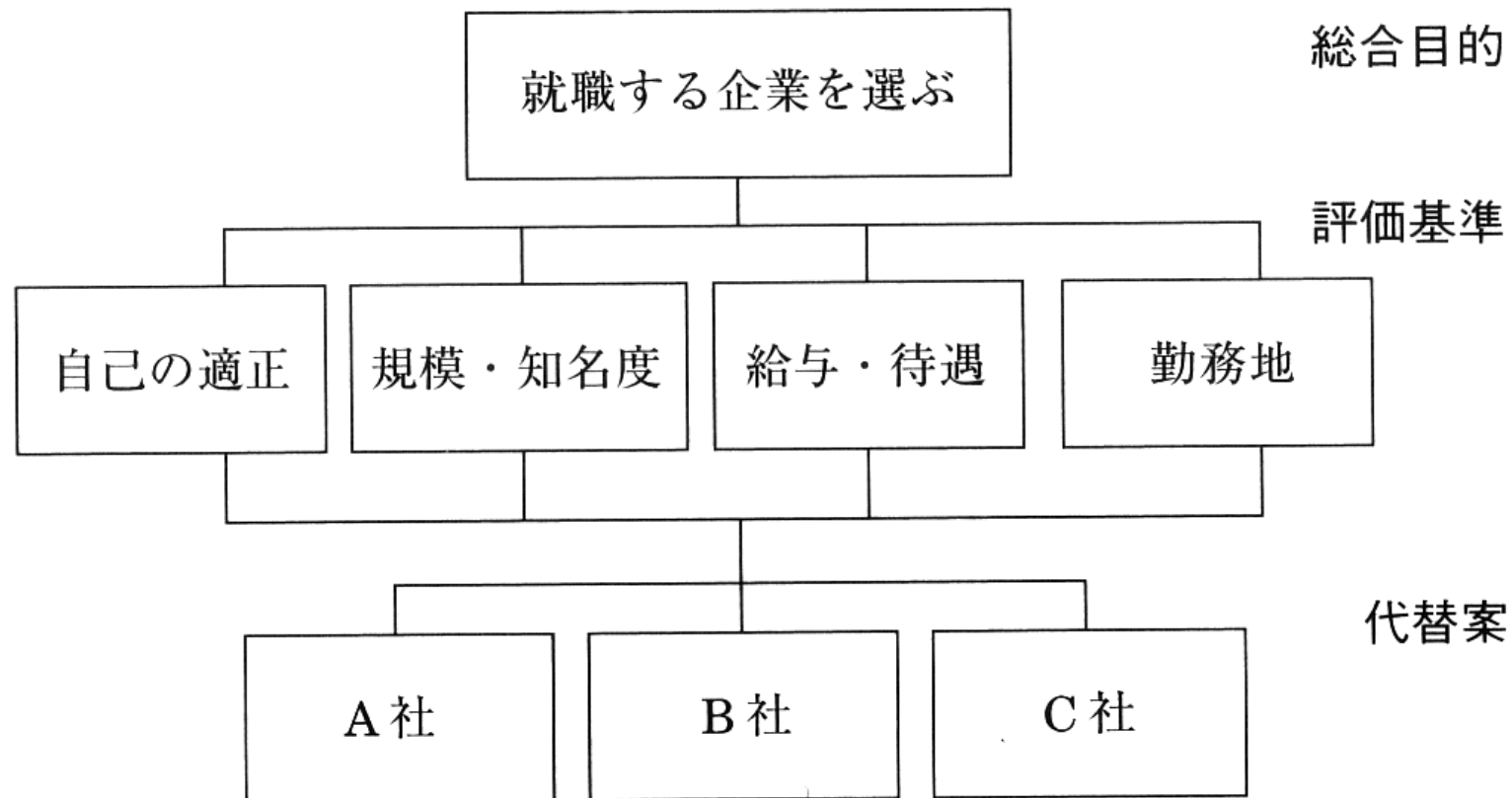
トレードオフ (trade off)

- 代替え候補を複数挙げ、それぞれの一長一短を比較検討しながら、最終的にシステムの要求を満たす最適なものを選択していく方法。

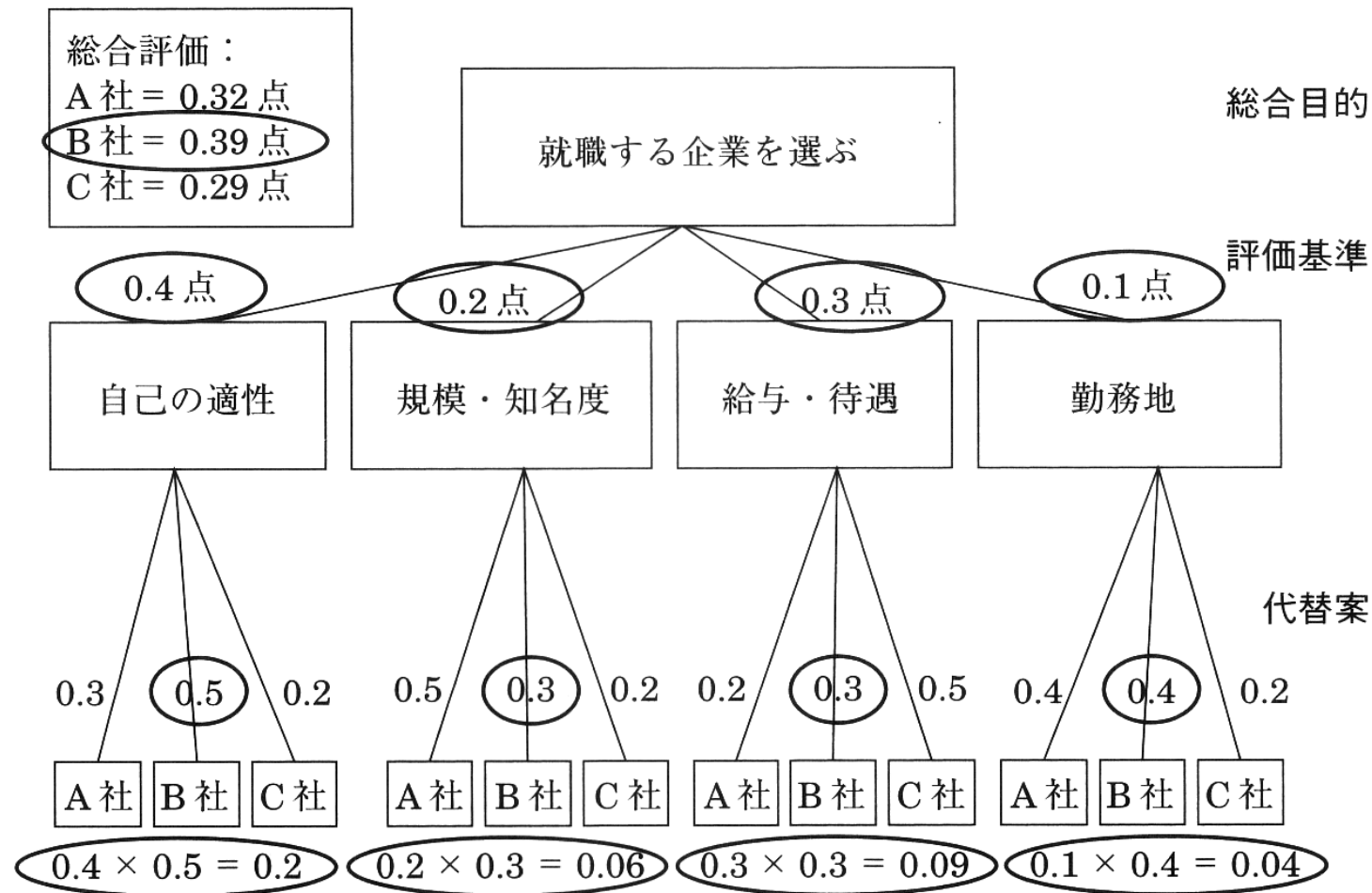
Dividing scheme		Radial division 	Symmetrical division 	Hexagonal division 
Assembling operation		Comparably simple because all the segments are symmetric.	Rather complicated because the segments have different figures and are non-symmetric.	Highly precise assembly is required because a segment must be coupled at six sides.
Mechanical performance	Stiffness /strength	Relatively low because the latched positions of a segment is less than the hexagonal division in numbers.		Relatively high.
	weight	Relatively light because of the same reason shown above.		Relatively heavy.
	Surface accuracy	Surface errors caused by heat are symmetric and can be controlled simply.	Non-symmetric thermal distortion.	Same as the radial division.
Evaluation		A		B



AHP (Analytic Hierarchical Process 階層化意思決定法)



AHP (Analytic Hierarchical Process 階層化意思決定法)



AHPの特徴

- ・ 評価基準がたくさんあって共通な評価基準がない問題に適している。数値として評価可能。
- ・ 重要度について「やや」「かなり」といった定性的な表現を、一対比較によって比較的簡単に数量化できる。
- ・ 結合ウエイトは選択肢を示しており、この値の大きい順に好ましい代替案となる。
- ・ **感度分析が重要**
 - 変動があり得るウエイトを仮に変化させて、選択の変化の有無を調べる
 - 意思決定の性質についても知ることができる。



作業分析とスケジュール管理

やりたいことは決まった 何から手をつければいいの



WBS (Work Breakdown Structure)

- ・ プロジェクトマネジメントで計画を立てる際に用いられる手法の一つで、プロジェクト全体を細かい作業に分割した構成図のこと。
- ・ プロジェクトを細分化して、その構成要素をツリー形式の階層構造等として整理したもの。
- ・ プロジェクト全体をいくつかの大項目に分け、それぞれの大項目をさらにいくつかの中項目、小項目へと細分化する。
- ・ 十分に細分化した後は、それぞれの小項目（ワーク・パッケージ）に対する具体的な作業を列挙する。

カレーライスを作る

カレーを用意する

- 材料を用意する
 - 肉を用意する
 - 野菜を用意する
- 道具を用意する
 - まな板と包丁を用意する
 - 鍋を用意する
 - コンロを用意する
- 材料を調理する
 - 材料を裁断する
 - 材料を炒める
 - 材料を煮込む

ライスを用意する

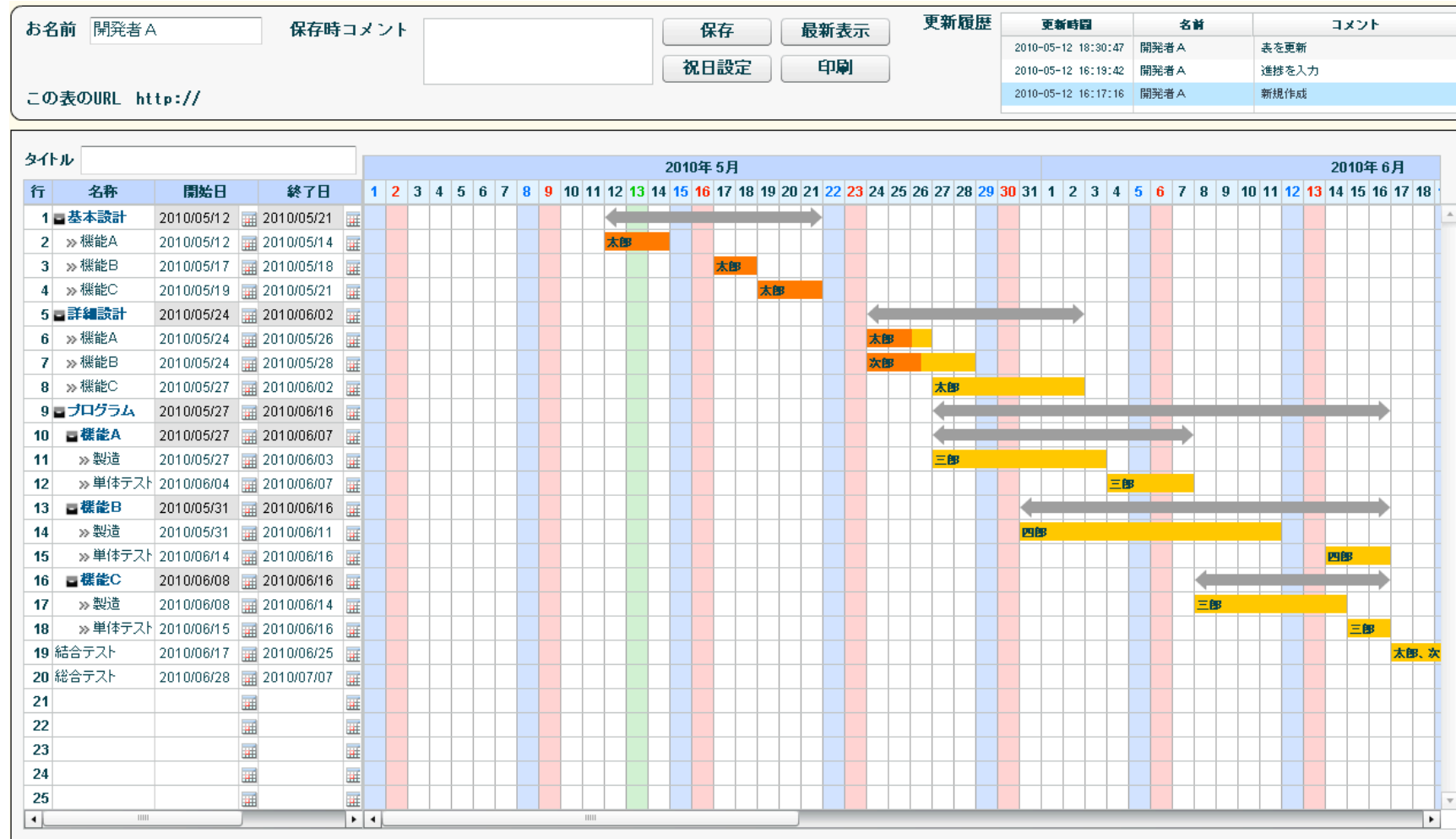
- 材料を用意する
 - 米を用意する
- 道具を用意する
 - 炊飯器を用意する
- 炊飯する
 - 米をとぐ
 - 水の分量を整える
 - 炊飯器のスイッチを入れる

盛りつける

- 皿を用意する
- しゃもじを用意する
- スプーンを用意する
- 食卓を飾り付ける



やることがわかったら スケジュール管理：ガントチャート





スケジュール管理のヒント

- ・ マイルストーンや拘束条件を明示する。
 - 試験や休み期間などのプロジェクトへ影響を与える要素についても意識する。
- ・ 作業の依存関係を明快にする。
 - 平行して出来ること、出来ないこと。
 - ある作業が終わらないと、始められないこと。
- ・ 最もクリティカルなプロセスを意識する。
 - その作業が完了しないと、ほかの影響を受ける作業
- ・ マージンを必ず見る。
- ・ 人的リソースを合わせて考える。



故障解析

考えたくないけど故障したらどうする？ (FTAとFMEA)

故障についても考えよう

- ・ 絶対に故障しない装置はありません。故障しないように祈っていても故障はきっと起こります。
- ・ 「その故障はどのぐらい起きる可能性があるのか」
- ・ 「その故障は何を引き起こすのか」
- ・ 「その故障はどのぐらい困るか」



どこをどのぐらい気をつけて
作ればいいのか分かる！！



FTA (Fault Tree Analysis)

- ・ 故障・事故の分析手法。
- ・ ミニットマンミサイルの信頼性評価を目的として、ベル研究所のH.A WATSONによって考案された。
- ・ 望ましくない事象に対し、その要因を探るトップダウンの解析手法を特徴とする。
- ・ 発生頻度の分析のために、原因の潜在危険を論理的にたどり、それぞれの発生確率を加算する。



FTA (Fault Tree Analysis)

- ・ 望ましくない事象の定義

- FTA図では、トップ事象を長方形の枠で囲み、図の最上段に配置する。
- トップ事象には、機器の故障に限らず「火災」など、どのような事故でも設定することができる。

- ・ トップ事象発生要因の摘出

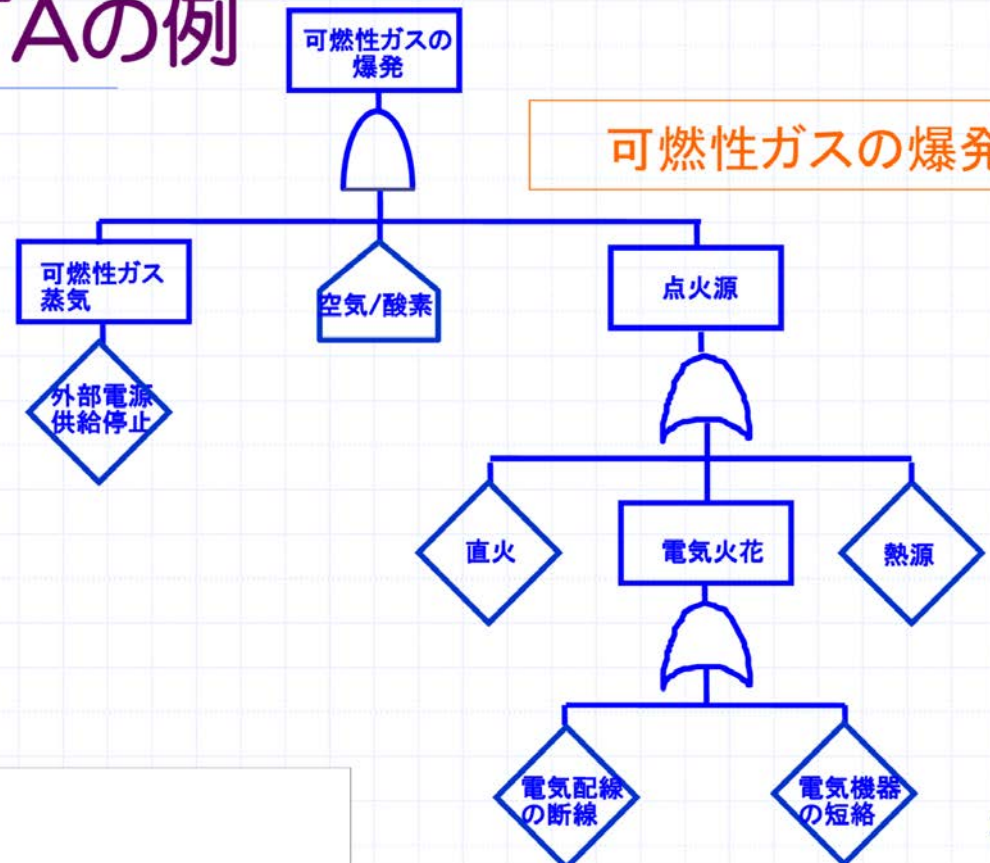
- トップ事象の下方に、トップ事象の発生に関与する要因事象を系統的に、漏れや重複がないように列挙する。
- 複雑なシステムを対象とする場合には、下に向かって、1次中間事象、2次中間事象、～という具合に階層に配列する。

- ・ 故障木図の作成

- トップ事象と基本事象の因果関係をブール論理を用いて表現したFault Treeを作成する。
- いずれか1つが発生すれば上位事象Xが発生する関係を示す論理記号をORゲート
- 全てが同時に発生した場合に限って上位事象Xが発生する関係を示す論理記号をANDゲート

FTA (Fault Tree Analysis)

FTAの例



13

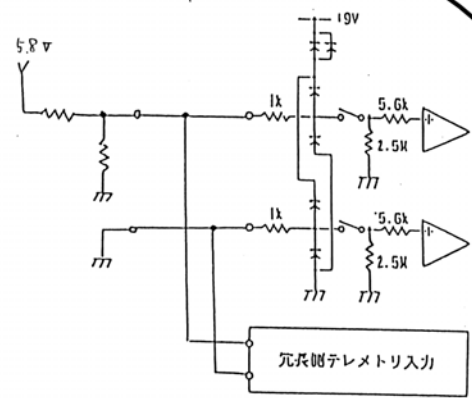


FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)

- ・ 故障・不具合の防止を目的とした、潜在的な故障・不具合の体系的な分析方法。
- ・ FTAがトップダウン手法であるのに対し、FMEAはボトムアップ手法である。
- ・ 直感的な説明：
 これが壊れたら何が起きる??
- ・ FTAの場合：
 こんな事はどうしたら起きる??

FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)

F T S - V I I インタフェース F M E A

インタフェース定義: 発信(A)側 受信(B)側	システム名: テュイリ	機番: T-C21-C52-2 REV: 74.6.15
借号等名称: アイティブイレベルテレメトリ (PWR ON/OFF) (記号: AB)		
A側システム: C/RBT 機器: C/RMOC	B側システム: C/PH 機器: C/RIU	
A側インタフェース回路 	B側インタフェース回路	
関連機器名(担当):		

故障モード (故障要因)	波及故障	相手機器/システム への影響	外部機器等への 影響 システム/ミッション運用 上の影響	是正処置	致命度
A側故障					
出力 0V	無	RMOC ON/OFF モータ不能	RMOC ON/OFF モータ不能	常置冗長のため 利用可能。 これは故障11 PC/PCハブ. off	3R
出力 5.8V	無	"	"	"	3R
B側故障					
入力開放	無	RMOC ON/OFF モータ不能	RMOC ON/OFF モータ不能	RIUを 冗長系に 切替える	3R
入力過電圧 (-3V ~ +13V) (冗長系RIUに接続あり)	無	"	"	"	"
入力短絡 (6.6kΩ直列)	無	"	"	"	"



「故障は起こさない」から 「故障は起きても困らない」へ

- ・ 故障は絶対に起きます。起きてほしくないことほど、必ず起きます。「故障は起こさない」はとても難しいです。
- ・ でも「故障は起きても困らな」ければいいのです。
 - 暴走しても必ずリセットする。
 - 無茶な指令を出さないようにする。出されても受け付けないようにする。
 - 想定外の状況になったら、とにかく安全を確保して待つ。
 - 打ち上げた後にも故障の状況がわかるようにする。



宇宙環境適合性

宇宙で動くってどういうこと？

宇宙環境は何が特殊か

- ・ 放射線環境

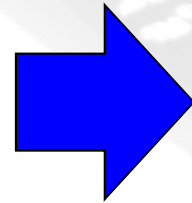
- 長期劣化・累積的損傷
→ Total Ionizing Dose (TID)
- 粒子線により発生する確率的故障
→ シングルイベント (SEE)

- ・ 高真空環境

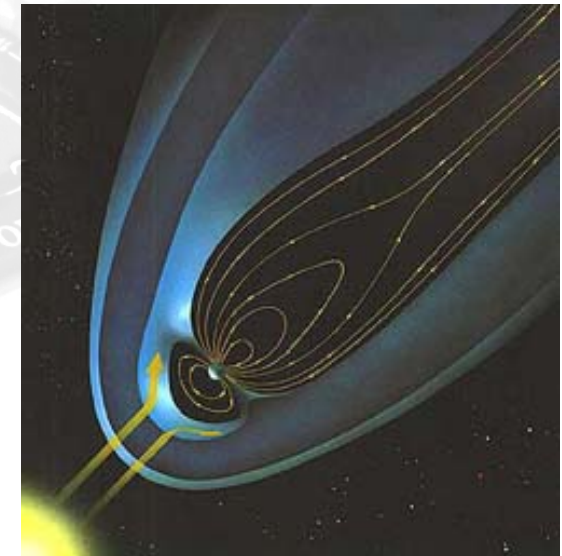
- 有機材料からの溶剤の遊離 (アウトガス)
- 熱条件
- ウィスカ形成

- ・ 振動条件

- ・ 帯電



適切な理解と
評価による克服





放射線による半導体への影響

- ・ 長期劣化・累積的損傷
→ Total Ionizing Dose(TID)
- ・ 粒子線により発生する確率的不具合
→ シングルイベント(SEE)
 - Single Event Upset(SEU) : ビット反転
 - Single Event Latch-Up(SEL) : 過電流発生
 - Single Event Burnout(SEB) : 過電流による焼損

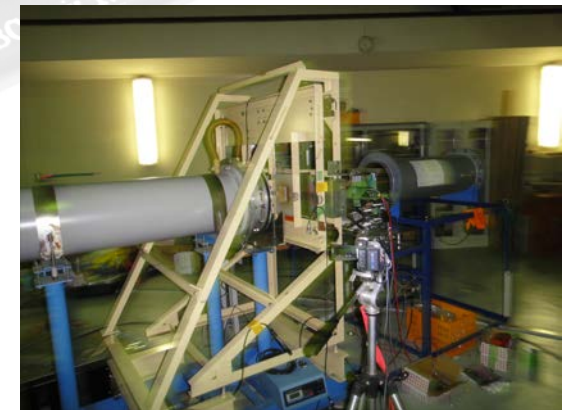
Total Ionizing Dose(TID)

- ・ 放射線による格子欠損の発生・累積
- ・ バンドギャップの低下
→電流値の上昇
- ・ ガンマ線照射により評価
 - コバルト60等ガンマ線源により発生するガンマ線を照射
 - 電流値と動作状態をモニターしながらガンマ線を照射
 - ガンマ線の量は距離と時間により調整
- ・ アニールング：非照射条件による自然復帰



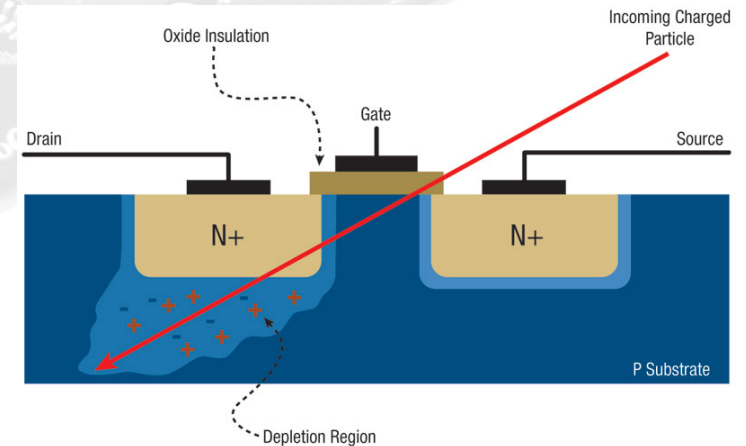
Single Event Effect (SEE)

- ・ 高エネルギー粒子が半導体に入射することにより、確率的に発生する不具合
- ・ 粒子線を照射することにより発生確率を評価する
 - － カリフォルニウム等の α 線源を用いる方法
 - ・ 比較的小規模な設備で実現可能
 - ・ デキャップが必要
 - － サイクロトロン等加速器を用いる方法
 - ・ 設備が大がかりで費用がかかる
 - ・ プロトン等実際の荷電粒子に近い条件での評価



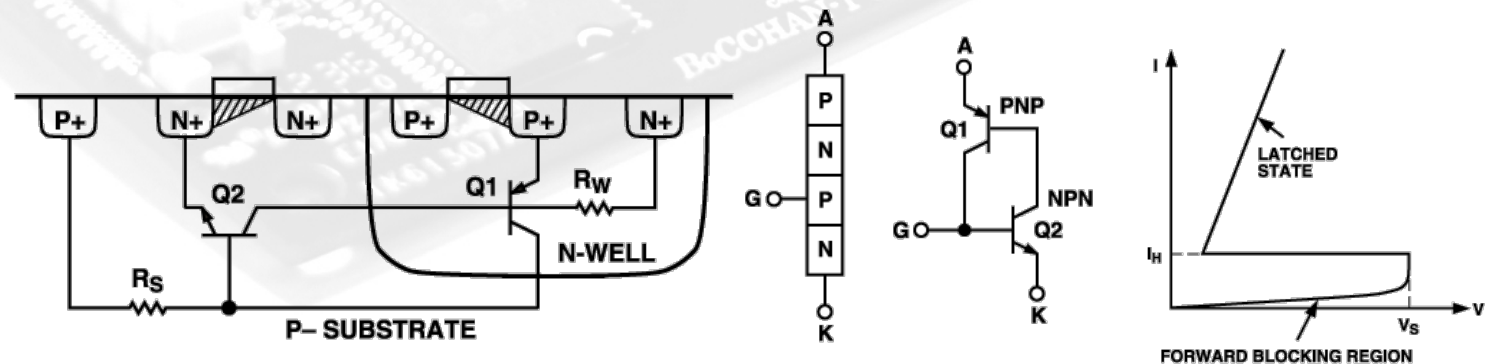
Single Event Upset (SEU)

- 高エネルギー粒子が半導体内を通過する際、半導体に荷電を発生。
 - 半導体の電荷の保持状態が変化
 - メモリの反転が発生
- メモリスクラビング（誤り訂正符号等による誤り検出訂正）等のソフトウェア対策



Single Event Latchup(SEL)

- 高エネルギー粒子の入射により発生した荷電により、メモリデバイス内に存在する寄生サイリスタ構造が起動することにより、過電流が発生。
- リセットにより回復
- 確率的に無視できない場合は、過電流検出・リセット回路により対策





高真空環境 アウトガス・熱条件

- ・ プラスチック材料等からの有機溶剤の遊離現象

アウトガス

- 光学機器への付着・汚染
- プラスチック材料その物の劣化

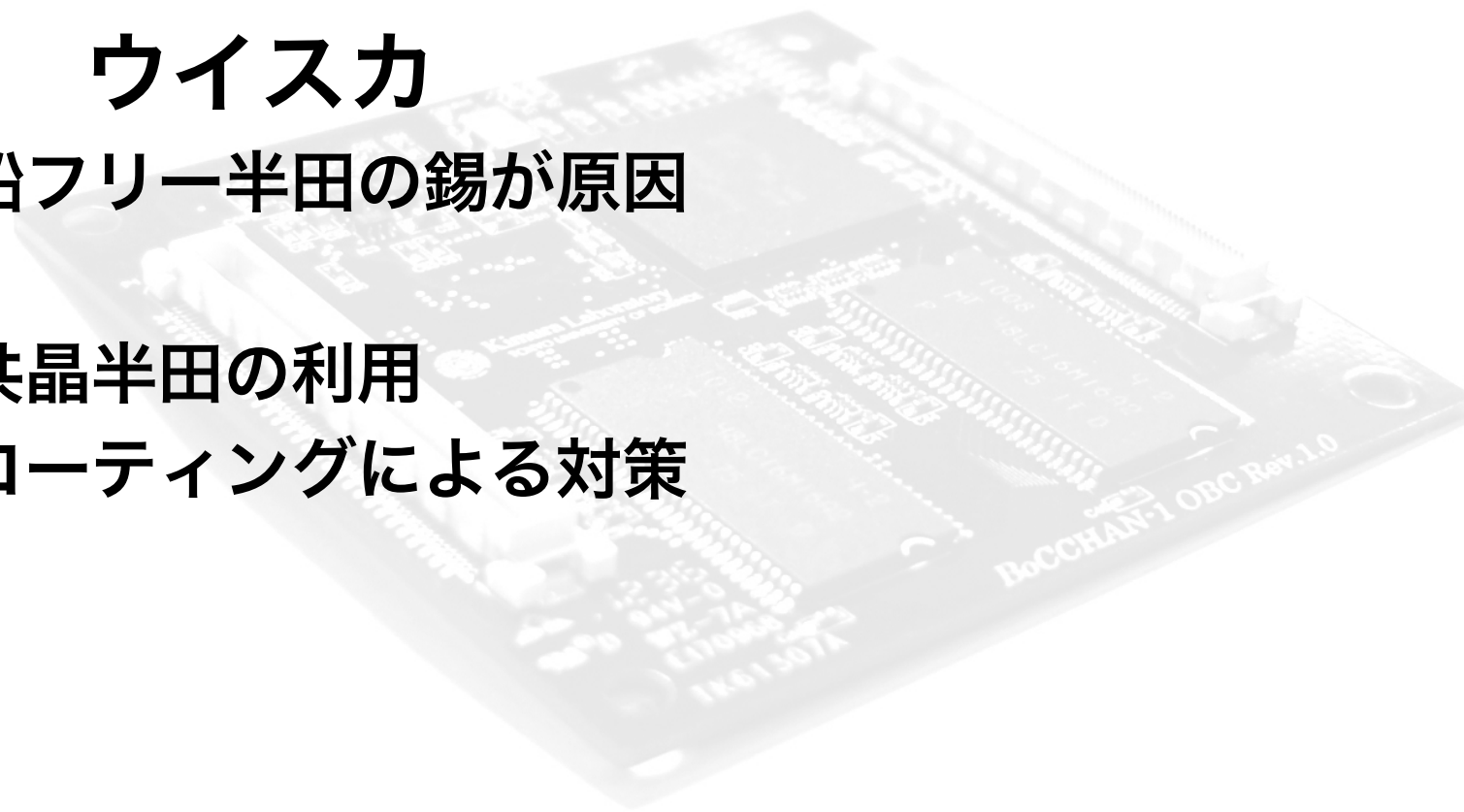
- ・ 対流による放熱効果がない

温度条件

- 放熱経路に関する対策
- デバイス選定による対策

高真空環境 ウイスカ

- ・ 鉛フリー半田は高真空状態に放置されると突起を形成
ウイスカ
- ・ 鉛フリー半田の錫が原因
- ・ 共晶半田の利用
- ・ コーティングによる対策



振動条件

- ・ 打ち上げ時の振動
 - 部品コネクタの脱落
 - 半田付け部への影響
 - 筐体への影響
- ・ 共振点をなるべく上げる
 - － 固定方法での対策
 - － 部品配置での対策



振動試験で評価

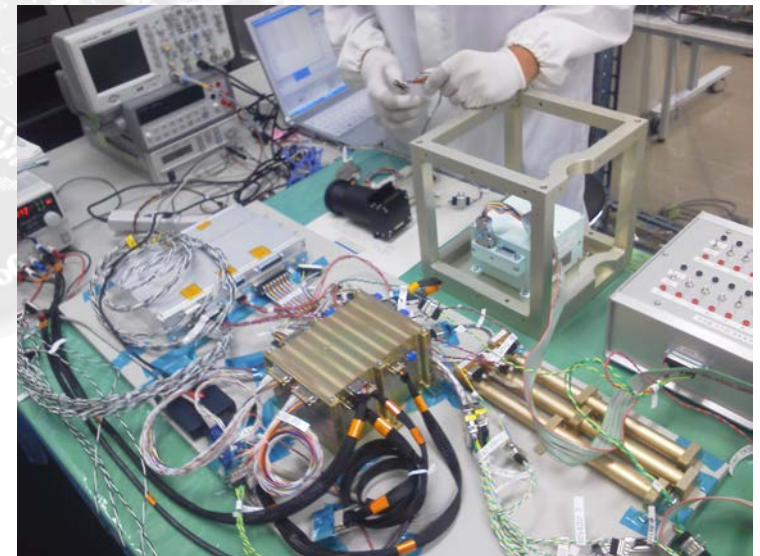


検証プロセス

ちゃんと動くかどうか
それは試さなきゃわからない

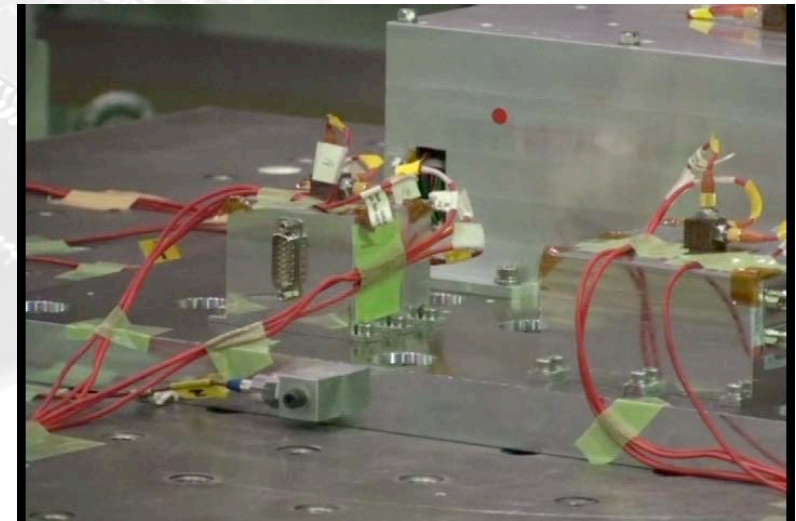
意図通りに動くか 機能試験（かみ合わせ）

- ・ 各機器は仕様通りの機能・機能を実現できるか。
- ・ 各機器の間のインターフェースは適切か。
 - 機械インターフェース（形状、質量、慣性性能率）
 - 信号インターフェース
 - ・ 信号レベル
 - ・ プロトコル
 - 電源インターフェース
 - ・ 電圧、消費電流
 - ・ 過渡現象



打ち上げるときに壊れないか 振動試験

- ・ 打ち上げ時にロケットからかかる振動の影響を調べる
 - コンポーネント単体試験
 - Engineering Model(EM)やStructure and Thermal Model (STM) 等を用いたシステム試験
 - 正弦波振動
 - ランダム振動
 - 破損の有無、ファスナーの緩み
 - 周波数特性、共振点
 - センサ等のアライメント



雨の日も風の日も軌道上で動くか 温度試験・熱真空試験

- 温度変化や真空の状態での温度変化が機器に与える影響を調べる。
- 軌道周回による温度変化
(温度試験)
 - 日照・日陰の温度サイクル
 - 温度条件が動作に与える影響
 - 温度変化による変形
- 高真空下での熱の影響
(熱真空試験)
 - 対流がない状況での温度の影響
 - 有機物の遊離：アウトガスの影響



まとめ

- ・ 衛星設計に見るシステム設計技術
 - V字プロセス
 - トレードオフ・AHP
 - WBS
 - FTA/FMEA
- ・ 軌道上環境適応

