

## 輸送システム開発におけるリスク管理の四方山話

### はじめ

小生の会社人生の後半は造船から離れておりまして、殆どの皆様はお前は誰じゃとお思いになると思いますので、簡単に自己紹介させていただきます。

小生は技術研究所で水力学の船舶設計への適用に係わる業務の後、船舶設計に移り、国際宇宙ステーションのきぼう号の空調装置の開発設計と NASA 認可に係わる業務、陸自の偵察ヘリコプター(OHX)の安全性・信頼性・整備性設計の審査に係わる業務、宇宙開発事業団 J-1 ロケットと H-II ロケットの打ち上げ安全審査に係わる業務、台湾新幹線の安全性・信頼性・整備性設計の審査に係わる業務に携わってまいりました。

一昔前に原子力発電所の存続にからんで安全神話とか確率的安全性評価とかの言葉が新聞紙上を賑わし、現在では世界的にも賛否が拮抗するようになりました。今日お集まりの方々も、夫々、安全性設計についてはご自分の経験を通して得られた一家言をお持ちのことと存じます。小生が船舶、航空機、宇宙機、鉄道車両での知り得た経験と概念をお知らせして、皆様の一家言の一助とさせて戴ければと存じます。

# 輸送システム開発におけるリスク管理の四方山話

2016年9月4日

増本 彰

## 目次

1. 緒論.....	3
2. システム安全性の考え方.....	5
3. 輸送システムに課される法規制.....	7
4. 輸送システムにおける不安全状態と事故.....	9
5. 重大事故統計.....	10
6. 定量的許容リスク基準.....	11
7. 輸送システムの安全性確保.....	15
7.1 乗客、従業員、周辺住民の安全性確保.....	16
7.2 乗客、事業者、周辺住民の財産の確保.....	21
8. 補償.....	21
付録 A－日本の宇宙開発概観.....	23

## 1. 緒論

安全を管理面でみると、**産業安全、労働安全、システム安全**に分類できる。産業安全、労働安全の分野は“法規、規準の遵守で労働者と周辺住民は安全であるとみなす”という世界である。しかし、一旦事故が起こると、損害賠償裁判において労働安全衛生法の言う所の“出来る限りの安全配慮がなされたかどうか”が問われることになる。この部分についての配慮がシステム安全の世界である。ここで、**システム**とは、**輸送機器、乗客、従業員、輸送事業者の財産、周辺住民とその財産、周辺環境**で構成されるものの意味である。

安全思想の基本は、対象がどんなものであれ、先ず、決定論的評価が必須である。即ち、法規、規準、技術基準の遵守である（昨今話題のコンプライアンス）。確率論的評価においても設計に起因する死亡事故確率は零が目標である。

システム安全性の考え方は、設計に起因する死亡事故確率は零を目標として、尚、異常気象、災害、バングリズム、製造上の不具合、人的過誤等による残存リスクを議論して出来るだけ制御していこうという思想である。即ち、設計以外に起因する事故に対しても、受ける利益と蒙る被害のバランスシートの上で、防護装置、非常系の設置、緊急手順、危機管理体制等を考慮していこうとするものである（昨今話題の危機管理）。

輸送システムに課せられた機能要求はハードウェア、ソフトウェア、システムに曝露される人間、メーカ、事業者、監督官庁、周辺環境に配分され、其々の部門で安全確保が図られる。システム安全性の“システム”はこのような意味で冠せられたものである。

安全性の議論には潜在的なリスク、即ち輸送機器の商品寿命で想定される不安全状態についての議論が不可欠である。不安全状態としては表-1 に示すようなものが想定される。これらは MIL-STD-882C に基づくものである。表-1 に示す **Hazardous components** (e.g., propellants, explosives, toxic substances, hazardous construction materials, pressures, and other energy sources) については昔から法律で安全性が担保されているが、新規開発システムでは法律適用是非の妥当性も確認する必要がある。

機器の故障に基づく不安全状態(**hazard**)については、各種の故障許容設計が適用されてきている。現今の安全性担保の課題は、重大事故の原因の殆どが人為的ミスによるものであることから、**Human Factor** を考慮した **Human Error** 対策とか無人化システムへと移行しつつある。

本稿では、宇宙輸送システムを例として、規格が示す輸送システム開発のリスク管理の考え方について紹介する。また、関連情報として日本の宇宙開発について付録 A に

示す。

表— 1 不安全状態 (hazard)

Design Hazard	Environmental constraints including the operating environments (Generic Hazard: common hazard to Equipment) (e.g., Sharp edge, drop, electrical shock, vibration, extreme temperatures, noise, exposure to toxic substances, health hazards)
	Particular Hazard (inherent hazard to Equipment: Fault Hazard in the FMECA) Hazardous components (e.g., propellants, explosives, toxic substances, hazardous construction materials, pressures, and other energy sources) Safety related interfaces considerations among various elements of the system (e.g., material compatibilities, electromagnetic interference, inadvertent activation, fire/explosive initiation, and propagation, and hardware and software controls)
	Interface Hazard (failure propagation hazard)
Operation Hazard	Operation Procedure Hazard Emergency Procedure Hazard Test Procedure Hazard Human Factor Hazard Operation Support Equipment
Maintenance Hazard	Maintenance Procedure Hazard Diagnostics Procedure Hazard Human Factor Hazard Maintenance Support Equipment
Environmental Hazard	Disaster Hazard Typhoon, Lightning, Seismic, External Fire, Flood
	Vandalism Hazard
	Terrorism Hazard

## 2. システム安全性の考え方

システム安全性では、輸送システムの商品寿命の中で想定される不安全状態を識別し、設計仕様との関係において、事故となるための条件、事故の頻度、最悪被害等进行分析し、障害予測数を求める (**Hazard Analysis**)。それが“許容される障害予測数”以下でなければ、事故が起これば、事故調査等を経て、膨大なコストの改善を余儀なくされるか、損害賠償等により、そのシステムの存在が許されなくなる。ここで、“許容される障害予測数”とは、被害者が許容すると言う意味ではなくて(被害者 sufferer はどのような Risk も許容しない)、輸送事業者が損害賠償で贖えるかどうかの意味である。輸送事業者にはこの覚悟が必要である。従って、国によって異なるものである。Political なものである。

Risk 許容の数値基準は決して安全の前面にでるものではなくて安全性の議論を正確に行うために必要なものである。即ち、安全目標は、可能な限りの安全配慮を行っても尚、確率論的に起こり得ると考えられる被害の程度について議論をするということである。即ち、Risk 許容基準は、それを満足できれば既成の安全配慮を緩和できるという性質のものではない。但し、既成の規準、法規緩和のトリガーにはなる。

“許容される障害予測数”として死亡率(Individual Risk)とリスクプロファイル(Societal Risk)がある。リスクプロファイルは死亡者数を横軸に死亡率を縦軸とした F-N Curve である。死亡率の許容値を上回る輸送システムは存在し得ない。リスクプロファイルの許容値を上回る輸送事業は成立しない。

### 安全性 (Safety Level)の定義

安全(Safety)の定義は仏教国もキリスト教国も同じである。安全は絶対安全であり目標である。

安全：女が家の中で静かにしている様子（広辞苑）

Safety : Freedom from those conditions that can cause death, injury, occupational illness, or damage to or loss of equipment or property, or damage to the environment (MIL-STD-882C)

規格というものは Originality を重んじるものである。それがために鉄道システムの RAMS 規格である EN50126 (IEC62278)が詭弁を弄していることと、定義上の矛盾が存在することがわかる。何れ本規格の権威は失墜するであろう。

### EN50126:

Safety: Freedom from unacceptable risk of Harm(危害)

被害者に許容できるリスクは有り得ない。詭弁である。

Hazard: A physical situation with a **potential for human injury**

Hazard Analysisは傷害だけが対象になっており安全の定義と矛盾している。

**顕在, 潜在は関係ない。**

#### IEC62278

Safety: Freedom from unacceptable risk of Harm(危害)

**被害者が許容できるリスクは有り得ない。詭弁である。**

Hazard: A physical situation with a **potential for human injury and/or damage to the environment**

Hazard Analysisは傷害と環境被害が対象になっており安全の定義と矛盾している。

**顕在, 潜在は関係ない。**

#### MIL-STD-882C

Safety: Freedom from those conditions that can cause death, injury, occupational illness, or damage to or loss of equipment or property, or damage to the environment

Hazard: A condition that is prerequisite to a mishap (注: Accident>Mishap>Incident)

安全性は Risk で量られる。受け入れられる安全性は許容リスクで決められる。**Risk** とは被害の程度と頻度を乗じたもの。一言でいうと“**障害予測数**”である。

**受け入れられるかどうかは Risk を事業者が損害補償で贖えるかどうかである。**

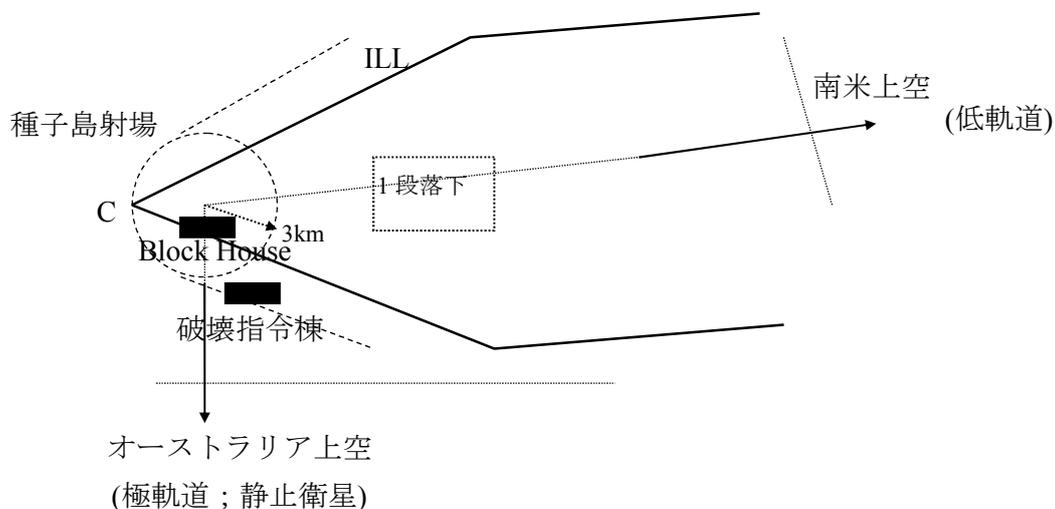
システム安全性の対象は新規開発品か既存品の改良品である。これは、存在が許されている物については安全性が認められていることによる。ロケット新規開発品についての **Hazard Analysis** を以下に示す。

先ず、製品がどのように使われるのか(mission profile)を想定する必要がある。

#### ロケットの Mission Profile

- (1) ロケット格納庫から発射点への移動
- (2) 液体ロケットの場合は燃料、酸化剤の注入
- (3) 打上げ延期の場合は燃料、酸化剤の排出(逆行作業)
- (4) 発射 (射点固定部品破壊)
- (5) 固体ブースタ分離: 経路確認、経路異常時は推力停止、指令破壊
- (6) 衛星フェアリング分離: 経路確認、経路異常時は推力停止、指令破壊
- (7) 1段分離: 経路確認、経路異常時は推力停止、指令破壊
- (8) 投入軌道確認
- (9) 衛星分離

(10) 2 段の廃棄軌道投入



3. 輸送システムに課される法規制

対象としている航空機、宇宙機、船舶、鉄道に対しては航空法、宇宙法、船舶法、鉄道法と個別の法律がある。これとは別に、潜在的に危険な機器に対する法律がある。例えば、劇毒物、高圧ガス機器、消防法、海洋法、労働安全衛生法等である。これらは決定論的に遵法を問うものである。更に、損害賠償保険業界の規則、輸送業界の規則等がこれに繋がる。

輸送システムの法規制体系

輸送システム	個別法規	国際法	共通法規	会社規程
宇宙機	宇宙法	海洋法	劇毒物、高圧ガス機器、労働安全衛生法	宇宙事業者の規定
航空機	航空法		劇毒物、高圧ガス機器、労働安全衛生法	航空事業者の規定
船舶	船舶法	海洋法	消防法、劇毒物、高圧ガス機器、労安法	海事保険業者の規定
鉄道	鉄道法		消防法、劇毒物、高圧ガス機器、労安法	鉄道事業者の規定

輸送システムの認可制度





#### 4. 輸送システムにおける不安全状態と事故

Hazard/Accident	ロケット、 宇宙往還機	航空機	船舶	鉄道車両
Common Design Hazard	機器落下 電撃	機器落下 電撃	機器落下 電撃	機器落下 電撃
Accident	地上被害	地上被害	乗員・乗客負傷	脱線、転覆、火災
Hazardous Equipment	推進燃料 高圧ガス 火工品	高圧ガス 可燃材料	可燃材料	可燃材料
Accident	内部火災 破裂	内部火災 破裂	内部火災	内部火災
Operation Hazard	燃料注入	離陸、着陸 燃料注入	離着岸	ドア扱い 駅停車 信号無視、信号故障
Accident	軌道上衝突	空中衝突	衝突 座礁	乗客負傷 列車衝突
Maintenance Hazard	高圧機器整備	高圧機器整備	高圧機器整備	高圧機器整備
Accident	感電	感電	感電	感電
Environmental Hazard	宇宙デブリ	乱気流	台風	地震、台風
Accident	衝突	乗員・乗客負傷	転覆、沈没	脱線、転覆
Environmental Hazard	落雷	落雷	落雷、津波	落雷、崖崩れ、地震
Accident	爆発	部分破壊	部分破壊	部分破壊、火災

## 5. 重大事故統計

過去における航空機の重大事故は空中衝突であった。最近は大ジャンボジェット機の出現により墜落事故がそれに加わった。

輸送システムにおける事故被害の拡大は乗客数の増加と無縁ではない。リスクは事故頻度(F)と事故被害程度(N)を乗じたもので定義されている。一言でいうと“**障害予測数**”である。リスクを下げるには頻度の抑制か事故被害程度を下げるかの何れかが必要となる。重大事故統計は事故被害の拡大防止とその発生頻度を少なくする動きの歴史を表している。輸送システムによるが、 $\log(FN) \approx -C \cdot \log(N)$  となっている。

データの出典；「我が国における原子力安全目標」平成4年3月  
(財)原子力安全協会 (原子力安全目標調査専門委員会)委員長；近藤駿介

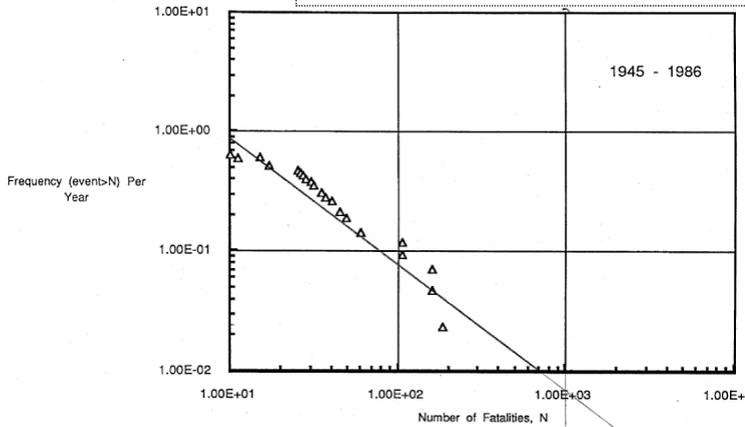


図5. 1-5 我が国に於ける鉄道事故のリスクプロファイル<sup>2)</sup>

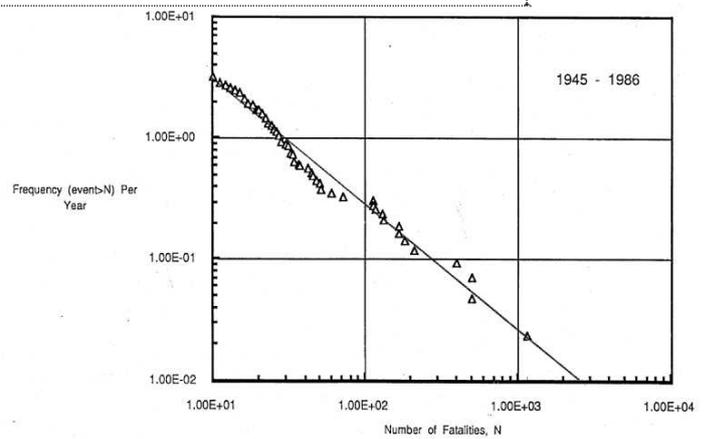


図5. 1-6 我が国に於ける船舶事故のリスクプロファイル<sup>2)</sup>

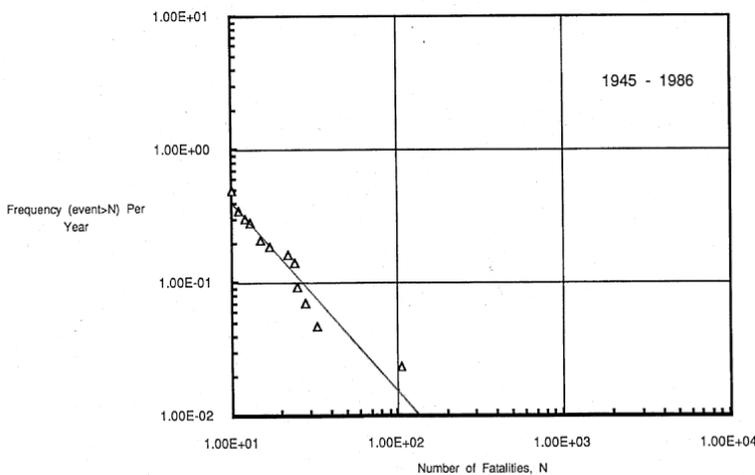


図5. 1-4 我が国に於ける自動車事故のリスクプロファイル<sup>2)</sup>

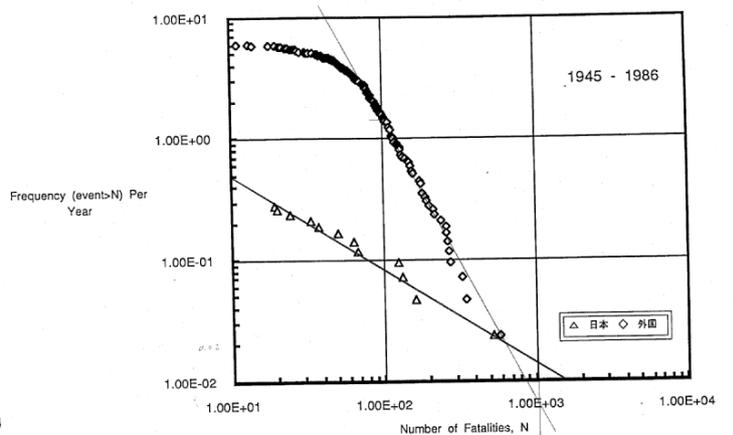
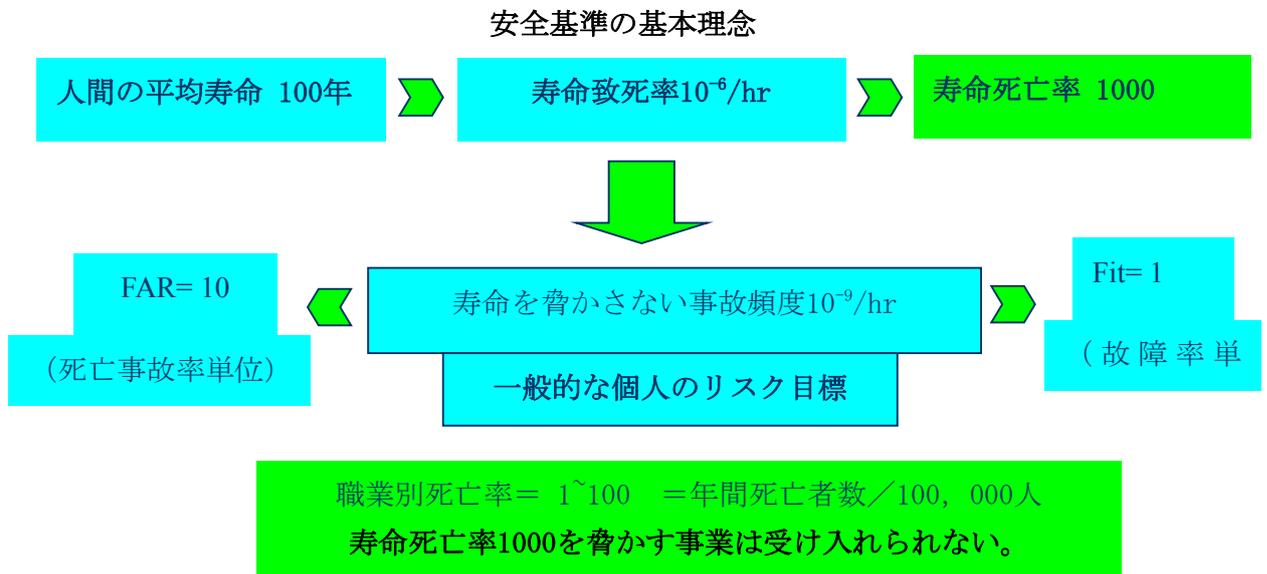


図5. 1-7 航空機事故のリスクプロファイル<sup>2)</sup>

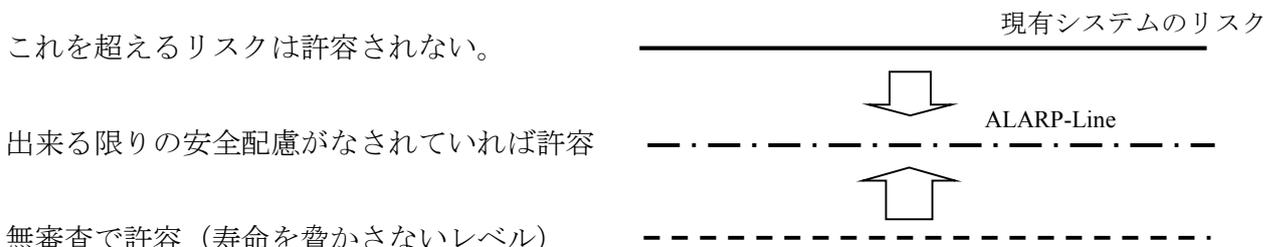
## 6. 定量的許容リスク基準



公衆、乗客、従業員に対する許容リスクは、公衆<乗客<従業員として定められる。これは以下の理由による。

公衆は輸送システムから何らの利益も得ていない。事故があれば、それは巻き添えである。従って許容リスクとしては最も低く抑える。乗客は輸送システムにより移動の利益を得ている。従業員は、そのシステムについて教育訓練を受けており危険性について知識を有している。ここで、許容 Risk とは、被害者 sufferer が許容すると言う意味ではなくて（被害者はどのような Risk も許容しない）、損害賠償で賸えるかどうかの意味である。従って、国によって異なるものである。Political なものである。このことは労働災害における傷害保険の料率が職業別の死亡統計に基づいていることから説明できる。ここで、定量的はオーダを与えるものである。有効数字は2桁未満である。

### 安全性基準の設定と適合性評価（国によっても異なる）



**ALARP:** As Low As Reasonably Acceptable

死亡率の許容値は以下のようにして与えるのが航空・宇宙業界の国際標準である。

人間の平均寿命は高々 $10^2$ 年である。即ち、  
 寿命による Individual Risk=  $10^{-2}$  fatalities / (person x year).  
 従って、オーダーを3つ下げて、  
 寿命を費かさない Individual Risk=  $10^{-3}$  fatalities / (person x year).  
 この考え方に基づき、

Public:  $10^{-5}$  fatalities / (person x year): System から何らの利益も享受していない。

Passenger:  $10^{-4}$  fatalities / (person x year) : System から利益を享受している。

Stuff:  $10^{-3}$  fatalities / (person x year): 不安全事故を理解し、訓練を受けている。

この考え方を最初に示したのは NASA 以前の米国空軍の宇宙センターである。(AFSC DH 1-6)  
 台湾新幹線で THSRC が定めた Safety Targets(Individual Risk)を以下に示す。

乗客死亡率 =  $10^{-10}$  (年間死者数 / 旅客人 km) =  $2.4 \times 10^{-4}$  / 年 (平均速度 172km/hr)

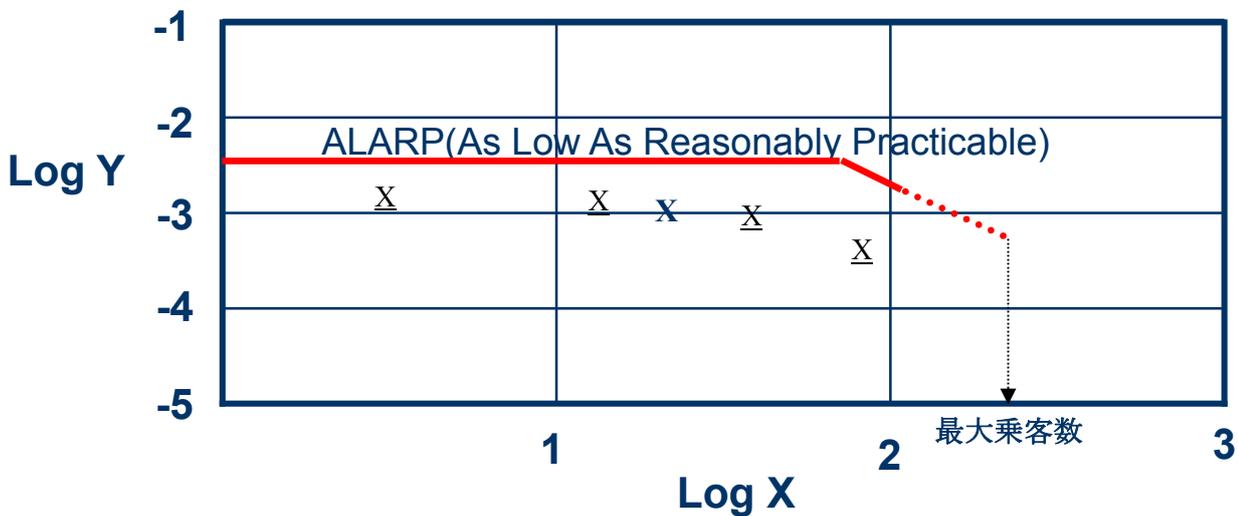
従業員死亡率 =  $2.5 \times 10^{-4}$  / 年 (日本の建設業で  $2.0 \times 10^{-4}$  / 年)

公衆死亡率 =  $2.5 \times 10^{-5}$  / 年 (従業員死亡率の 0.1 倍)

リスクプロファイル(Societal Risk)の許容値の例として香港郊外電車の場合を以下に示す。

但し、Y: Frequency of X or more Fatalities

X: Number of Fatalities



許容リスク基準

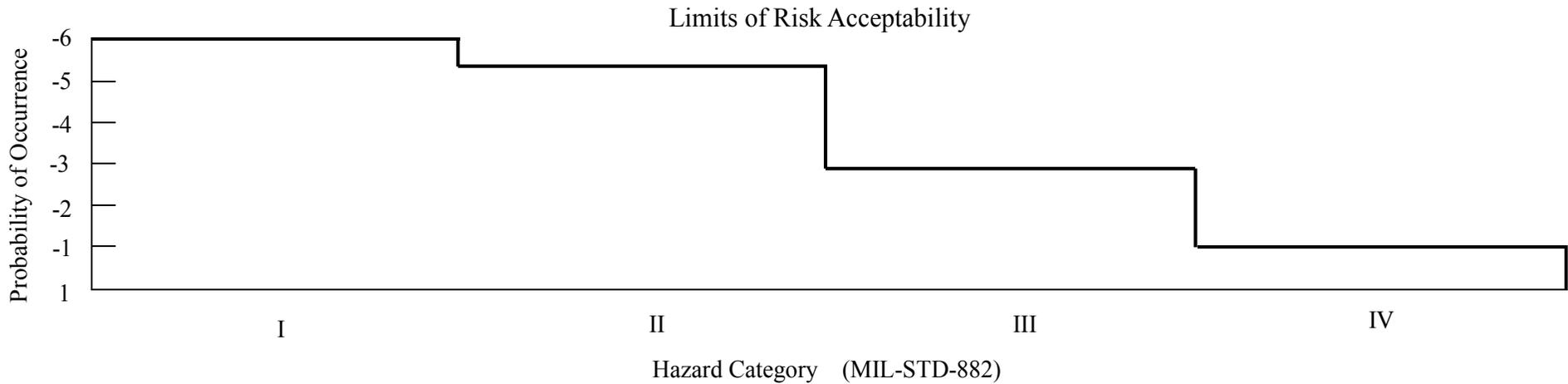
個人リスク(事故頻度)	ロケット、宇宙往還機	航空機	船舶	鉄道車両
周辺住民・公衆	$10^{-5}$ (per 1 任務 or hr)	$10^{-9}$ per hr	$10^{-9}$ per hr	$10^{-9}$ per hr
乗客		$10^{-8}$ per hr	$10^{-8}$ per hr	$10^{-8}$ per hr
従業員・乗員	$10^{-5}$ (per 1 任務 or hr)	$10^{-7}$ per hr	$10^{-7}$ per hr	$10^{-7}$ per hr
社会的リスク(死亡者数)	ロケット、宇宙往還機	航空機	船舶	鉄道車両
周辺住民・公衆	$10^{-5}$ (per 1 任務 or hr)	$3.0 \cdot 10^{-6}$ (1 任務 or hr)		
乗客		$10^{-5}$ (1 任務 or hr)		
従業員・乗員	$10^{-4}$ (per 1 任務 or hr)	航空機乗員は $1.5 \cdot 10^{-4}$ (1 任務 or hr)		



許容リスク基準は数字が一人歩きするので、一般的には周知されない、衆知されない。

許容リスク基準の例

AFSC DH 1-6



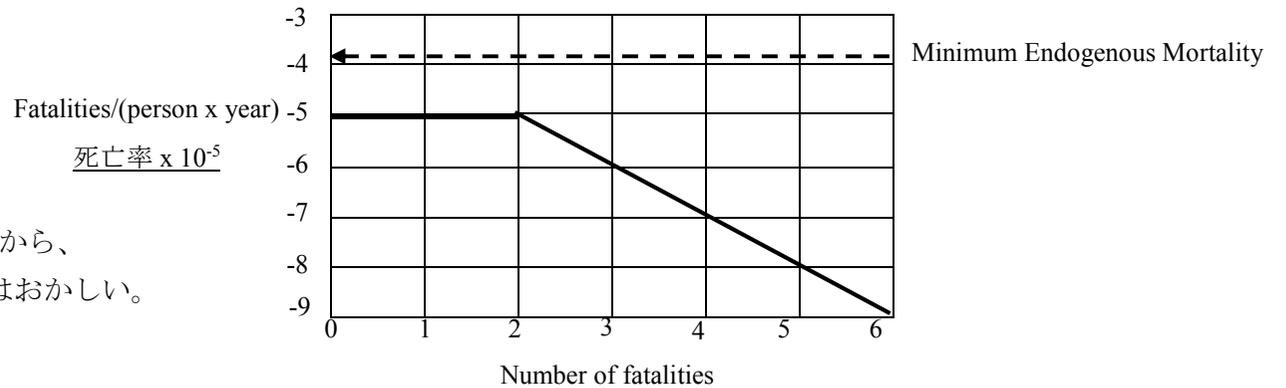
Probability of Occurrence は、ある時間における発生確率或いは 1 時間あたりの頻度である。-1 は  $10^{-1}$  の意味である。

EN50126 (Practice in Germany)

許容される個人のリスク

1 は  $10^{-1}$  の意味である。

寿命の Fatalities/(person x year)は  $10^{-2}$  であるから、  
右の表での Minimum Endogenous Mortality はおかしい。



## 7. 輸送システムの安全性確保

System Safety の目標は、「乗客、従業員、周辺住民が死傷しないこと、乗客、事業者、周辺住民の財産が損なわれないこと、周辺環境が損なわれないこと。」である。

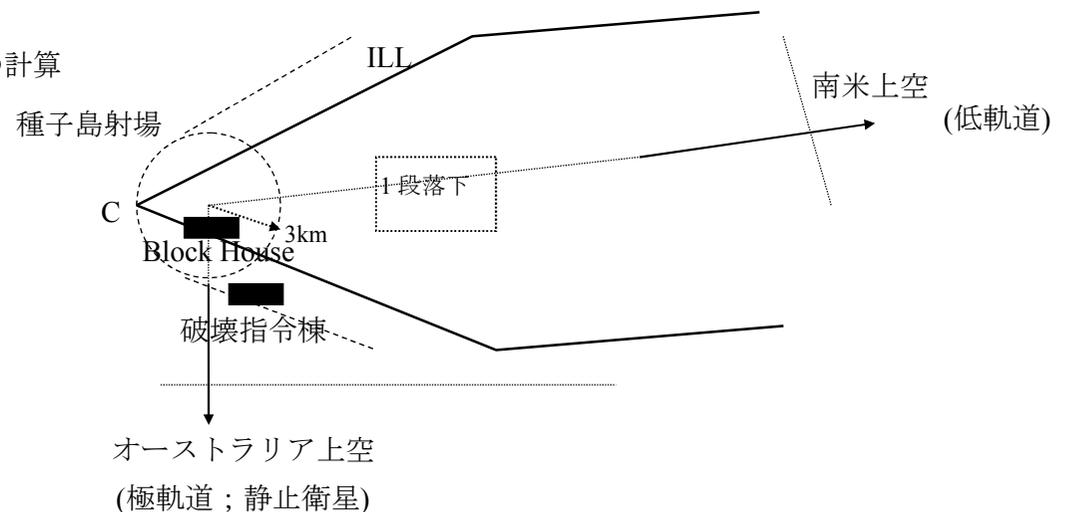
ロケットのリスク回避の方策を以下に示す。

- (1) 指令破壊と自爆機能（早期分離時）：最大破片の目標値
- (2) 軌道を定期空・海航路からはずす [国際法]。海上進入禁止区域、警戒区域の設定。
- (3) 軌道、ブースタ、衛星フェアリング、1 段の落下点の国際通報 [国際法]
- (4) ブロックハウスの人員制限
- (5) リスク評価
  - a. 爆発威力(爆風圧、破片の飛散)の計算、b. ブロックハウス(B)の強度確認
  - c. 有毒物質の拡散範囲の計算、d. 陸上、海上警戒区域の設定
  - e. 指令破壊線(ILL)の設定
  - f. 大気圏脱出までの軌道における**落下確率と傷害予測数**の計算  
(Hazard Map)
  - g. ブロックハウス定員の計算
  - h. 第 2 段の大気圏再突入時の熔融分解計算

リスク回避の方策における優先順位を以下に示す。

- (1) リスク原因の除去
- (2) リスク発生頻度の低減
- (3) リスクの緩和

人工衛星、地球軌道上輸送機については別途口頭説明



### 7.1 乗客、従業員、周辺住民の安全性確保

安全対策とその優先順位は MIL-STD-882C に示されている。System Safety は Risk で量られる。それらは、Risk 軽減の観点で、以下のように整理される。

Priority	Risk 軽減策	安全対策
1	Hazard の除去	Hazard Cause の除去
2	被害零	フェールセーフ、被害が巻き添えのみの場合は、巻き添えが発生しないようにする。
3	事故頻度軽減	冗長系。信頼度の reset は予防整備で実施され、状態監視で信頼度 reset 時期を見出す。人的過誤に人間工学適用
4	事故被害軽減	故障許容、フェールセーフ、防護装置
5	事故被害拡大防止	状態監視警報、緊急手順、避難訓練、避難設備、 <b>危機管理体制</b>

更に、暗黙の了解事項として、以下の故障許容要求がある。

任務信頼度(Single Failure Point for System Reliability) : 2 冗長、人員の死亡 : 非常系を含めて **3 冗長**、人員の重傷 : 2 冗長

**Fail Safe** : 故障許容性による人員の安全と運用性の確保、**Fail Operative (Fail Safe Operation)** : 故障許容性による full 運用性の確保

輸送システムにおける主要な事故を以下に示す。

輸送システムにおける主要な事故

	ロケット、宇宙往還機	航空機	船舶	鉄道車両
主要な事故	射点爆発、落下、火災、再突入失敗	空中衝突、墜落、火災	座礁、転覆、沈没、衝突、火災	脱線、転覆、衝突、火災
事故被害	射点周辺への爆風圧による周辺住民死傷 破片による打上げ要員死傷 射点周辺への fire ball による火災による周辺住民死傷、 周辺地域汚染 落下による軌道下住民死傷、乗員死亡	乗客・乗員、周辺住民死傷	乗客・乗員死傷 海洋汚染	乗客・乗員、周辺住民死傷

輸送システムにおいてとられている安全対策の概要を以下に示す。

輸送システムにおける安全対策

安全性確保の方法		ロケット、宇宙往還機	航空機	船舶	鉄道車両
1	Hazard Cause 除去	劇毒物の燃料を避ける。 有人宇宙機は純酸素の使用を避ける。 落下時に燃え尽きないチタンを避ける	可燃材料・有毒材料を避ける。	可燃材料・有毒材料を避ける	曲線部カント 車両限界設定 占有軌道 可燃材料・有毒材料を避ける。
2	被害零	軌道下は公海上と人口過疎地域（国際法） 指令破壊限界線設定 打上げ軌道・再突入軌道通報（国際法） 軌道上修理交換 海上落下物は沈めるか回収（国際法）	航空路は人口過疎地域、原子力発電所上空は避ける。 航路設定 損傷許容設計		閉塞区間の設定と ATS（フェールセーフ設計）
3	事故頻度軽減	再突入制御機能の冗長化（3系統） 状態監視装置 故障検知装置	Auto-pilot 航空管制 航空機衝突回避システム 重要部の冗長化 アンチスキッドブレーキ 定期修理検査 自動離着陸の機能 フルプ <sup>ル</sup> ーフ設計 状態監視	右側通行の原則、相手船を左に避ける。 航路設定 レーダー、測深器、Auto-pilot ウェザールーチン航法 定期修理検査	ATC（冗長化） 蛇行運動防止設計 アンチスキッドブレーキ 定期修理検査 状態監視装置 故障検知装置 地震検知、 風速検知 脱線防止ガード Dead Man System

安全性確保の方法		ロケット、宇宙往還機	航空機	船舶	鉄道車両
4	事故被害軽減	再突入制御機能の冗長化（3系統） 地上警戒区域の設定、射点 Block House	自動離着陸の機能 フルプロトタイプ設計 酸素マスク エンジン自動消火装置 対雷性 対着陸性 シートベルト	定期修理検査 二重底 隔壁 生存率の設定	対衝突性 アンチクライマ 対雷性 変電所の瞬断装置 軌道逸脱防止ガイド
5	事故被害拡大防止	射点 Block House からの脱出トンネル 宇宙往還機非常脱出口 打上げ作業の逆行手順	携帯用消火器 非常脱出装置 緊急脱出手順 ヘリコプタの Auto-rotation 訓練	オイルフェンス 救命艇・筏 消火装置	トンネルからの脱出口 脱線防止ガイド 携帯用消火器 非常脱出装置、非常脱出窓 警報装置
6	損害賠償責任	全面的に国家賠償責任（国際法）	事業者賠償責任（保険）	事業者賠償責任（保険）	事業者賠償責任（保険）

安全対策はシステム仕様と密接に関係したもので、システム仕様が変われば安全対策も変わるものである。それ故、安全対策を法制化すると、システムの進化を妨げ、時には悪法となる場合がある。

Risk 許容の数值基準は決して安全の前面にでるものではなくて安全性の議論を正確に行うために必要なものである。即ち、安全を目標として可能な限りの安全配慮を行っても尚、確率論的に起こり得ると考えられる被害の程度について議論をするということによって定められるものである。従って、Risk 許容基準を満足できれば安全配慮を緩和できるという性質のものではない。

完全自動化も安全化一つの流れであるが、非常系の reset とか解除が簡単に出来るようなシステムは運転者の vandalism に対しては無防備と言える。

軍用飛行機で補助燃料タンクの落下、コックピット風防の不意爆破がたまにある。これらの操作は3段操作でしか作動できないようになっているのに不思議である。Vandalism の原因をつきとめないと正しい対策はとれない。3段操作の各操作毎に音声での注意喚起が必要なかもしれない。Vandalism は運転者の肉体的、精神的な疲労からくるのかもしれない。

UK の Railways Regulations が運転士に長時間勤務を課すことを禁止したことからもこの事が伺える。JR 西の脱線・転覆事故では、科学的な事故原因は略解明されているのに、原因調査にてこずっているのはこの辺りに理由があるように思える。事故責任追求とは別に、事故の底にある原因を明らかにすることが重要である。運転士も‘根底にある原因’の被害者かもしれない。人間は機械の一部ではないのだから。

Human Factor Engineering は人的過誤を無くすために、人間に要求される機能・性能を分析し、人間として間違いなく機能が発揮できるように機械に要求を課す分析検討である。言葉を返せば、これは人間を機械の一部として扱っていることだと思われる。人間工学には人間感情がない。何でもかんでもという訳ではないが、重要機能、非常機能には人間工学と心理学面からの分析検討が必要であろう。

重要機能、非常機能の操作には緊張を伴うものである。例えば、ロケット打上げにおける指令破壊の決定は、数百億の財産を一瞬の中に失わせるものであることから操作員は極度の緊張にある。しかも判断は短時間に為されねばならない。System Safety の目標は安全と可動率(任務信頼度)の確保である。事業者と運転士はとっさの判断の場合に、安全と任務のどちらを優先するであろうか、技術への過信が任務信頼度を優先させているにはあるまいか。

## 7.2 乗客、事業者、周辺住民の財産の確保

輸送システムの可動率確保、運行コストの適正化（損益分岐点）が目標となる。

## 8. 補償

事故補償については労働安全衛生法で定める労働者の死亡統計に基づく保険料率に従った補償と同じである。

事前払いとなる“危険手当”という言葉は法的に認められていないし、存在しない。特別手当の意味は、“従業員が危ないと思う精神的苦痛に対して支払われる対価”というのが法律的解释である。

「従業員を一名でも常時雇用している事業主は労働者災害補償保険法により労働者が希望すると否かに関わらず政府労災保険に加入しなければならない。(労働基準法第8章75条：災害補償の事業主責任)」現在のところ、その給付内容は労働基準法の補償水準を越えたものになっている。

政府労災保険の保険料は次式で算出される。：賃金総額 x 労災保険率  
交通運輸事業の場合、料率は **0.007** となっている。



## 付録 A－日本の宇宙開発概観

### 1. まえがき

宇宙とは塵とかガスとか質量が存在している場所を言う。宇宙空間とは質量が存在している場の中の空間を言う。宇宙は無限か有限か？ 長さは速度で規定されるので光速で無限時間かどうかの議論になる。この意味では宇宙は有限(数百億光年)である。

地球のどこから宇宙なのか成層圏外が宇宙空間である。人間が生存可能なのは、その内側の対流圏である。対流圏の厚さは 10km、地球の半径は 0.638 万 km である。黒板に半径 1m の円を書くとチョークの厚さ 1.6mm が成層圏である。人間はこのように薄い層に住んでいる。人間の生存条件は酸素分圧、温度である。実に微妙な条件下で生存している（表－1 参照）。人間が宇宙に出て行くためにはこの条件を満たすことが宇宙開発での必須条件となる。また、太陽の黒点活動の激しい時期は陽子等の重粒子が降り注ぐので、太陽系の宇宙空間での有人活動は不可能となる。人工衛星等も電子機器の部品が核反応を起し障害をきたす。人間にとって宇宙が危険で、地球がいかに安全であるかが分かる。アポロ計画までの有人宇宙開発の思想は Earth to Planet、それ以降は、上記のことが理解され Planet to Earth の思想となった。これが国際宇宙ステーション(無重力および真空利用の実験棟)として来年には結実することになる。

表－1 国際宇宙ステーションの環境条件

Parameter	Respirable atmosphere requirement
CO <sub>2</sub> partial pressure	3.0 mmHg max.
<b>O<sub>2</sub> partial pressure</b>	<b>2.83 ~ 3.35 psia</b>
Trace contaminants	Less than Maximum Allowable Criteria
Humidity	25 ~ 75 % R.H.
Temperature	18.3 ~ 26.7°C

### 2. Earth to Planet

宇宙開発の歴史は独逸の V1 ロケットから始まる。米軍が独逸の核開発技術者を連れ帰る筈が、核開発なんかは実施していなくて、ロケット開発の技術者を連れ帰ったことから始まる。米軍は大型ロケット、露軍は小型ロケットの技術者を連れ帰った。実はこのことが、有人宇宙で露西亜が米国に一步先んじたことに繋がる。何トンもの衛星、輸送機(payload という)を打ち上げるには小型ロケットを束にして大型化を図るほうが簡単だったからである。現在もこの優位は変わらない。

日本の宇宙開発は糸川博士のペンシルロケットで固体ロケットの設計思想を学び文部省の M ロケットとして実を結んだ。宇宙開発事業団は日産自動車を通じて米国の固体ロケット技術を導入して N ロケットとして実を結んだ。宇宙開発事業団の J-1 ロケットは一段が N ロケット、二段が M ロケットであったが、設計思想の異なるものを繋いだもので完成には色々苦勞があったようである。宇宙開発事業団は大型ロケットとして

液体(水素、酸素)ロケット H-I、H-II を完成させ、更に製造コストダウンを図った H-IIA を完成させた。液体ロケットの燃料としては推力の大きいヒドラジン、NTO がある。露西亜、中国、北朝鮮はこれを採用しているが、これに触れた場合には、ヒドラジンは強発ガン性、NTO は即死となる厄介な代物である。射点事故、途中落下の場合にはとんでもないことになる。

### 3. Planet to Earth

人間の住む所は銀河系で地球以外には無いことが分かり、外に打って出る前に地球をもっと調べて大事にしよう。ということから陸域観測衛星、気象衛星、宇宙空間利用として通信衛星、国際宇宙ステーションが開発された。地球環境に関する現在の国際動向もこれと無縁ではない。宇宙空間に物(payload)を輸送するには、それと同じ重量の金のコストがかかると言われている。現在もこれに大きな変わりはない。宇宙開発も商売(pay)である。顧客は郵政省、防衛省、気象庁、文部省、通信会社、製薬会社、金属精錬会社等、目的によって様々である。

### 4. 宇宙開発における制約条件

ロケットの打上げ軌道傾斜角は赤道上東向きを零とする。低軌道衛星は地球重力と遠心力の釣り合いの関係から軌道傾斜角を小さくする。極軌道衛星は傾斜角を  $90^\circ$  に近くする。別名静止軌道(地球と一緒にまわるので地上からみて静止)と称する。日本の低軌道衛星は南米上空を過ぎて軌道に入る。静止衛星は南極大陸を過ぎて軌道に入る。種子島に射点があるのはこの理由による。米国はカルフォルニア、フロリダ、露西亜は国土の西部地区、中国は西方砂漠に西端、欧州は南米のギアナである。北朝鮮は国際海峡である津軽海峡の上を飛ばすしかない。

地球引力圏を脱するには強力なロケットが必要である。これが宇宙開発に金が掛かる理由である。引力圏を脱すれば、太陽光の力を利用した帆掛け舟も理論的には成立する。月資源を利用した月面基地からの宇宙開発の構想も存在するが、太陽からの重粒子に対して無防備な月では、それが克服すべき大きな課題である。米国の場合、固体ロケットで最大のタイタンを毎週(カルフォルニアとフロリダで交互)打っている。膨大な軍事予算の故である。民間プロジェクトで300機の携帯電話用の通信衛星を打上げるガリレオ計画は挫折した。打上げ費用低減競争はこれからも続くが、技術開発より予算の確保が最大の課題である。スペースシャトルはOrbiter(軌道機)だけが再使用型でスペースシャトル全体としては使い棄てである。

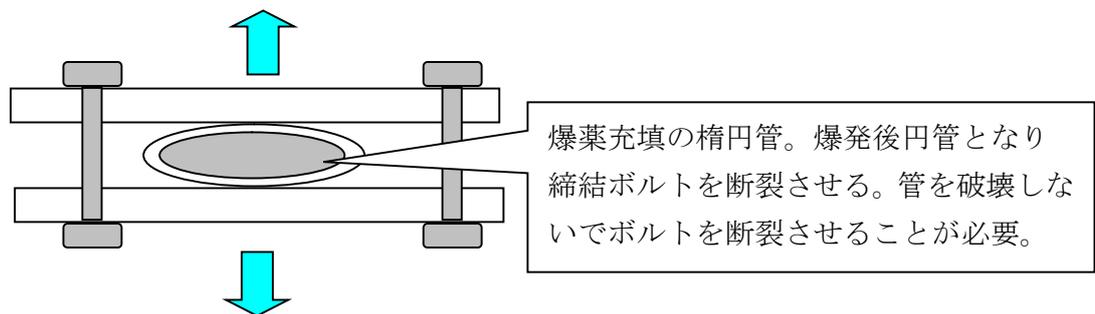
地球の低軌道は今やロケット、衛星の残骸で埋め尽くされている。今後の打ち上げの障害にもなる。事実欧州のロケットの締結部品が打上げた衛星に衝突したことがあった。残骸は何れ地球に落下して燃え尽きるとされているが、定期航路外にいる漁船に落下したことがあった。ガス化、液化したものの地球環境への影響の議論はなされていない。

宇宙開発のもう一つの問題は、他国に対する事故時の賠償責任が全面的に日本にあるということです。打上げは国際法に適合していればOKですが、賠償責任を担えないと打上げられません。保険会社と契約しても保険料が払えないかもしれない。下手をすると戦争になる可能性がある。北朝鮮は津軽海峡上をとばしているの、一段目落下地点、時刻の事前通報をしなかったことが唯一国際法違反ですが、保険をかけていないと思われるので問題視されるわけです。

## 5. 日本の宇宙技術

航空機にも無い宇宙システム独特の技術を以下に紹介します。

**分離装置**：一段・二段分離、衛星フェアリング分離、液体ロケットの射点固定分離



**液体輸送用の楕円管**：圧力変化、温度変化に強い。組み立て時に無理をすると亀裂。

**金属材料**：軽いものが要求されるが、再突入時の空力加熱で燃え尽きないチタンは使用できない。

**軌道上でのドッキング**：軌道高度が軌道速度の関数になっているので、後方から加速して接近すると軌道高度が上がってしまう。まずは、後方から加速して軌道高度を上げて追い越す。次にゆっくり減速して高度を下げながらオカマでドッキングする。地球の引力圏内でスターウォーズのような操縦は原理的に無い。

## 6. 日本の宇宙開発ビジネス

宇宙開発の組織体制は以下のようになっている。

監督官庁（科学技術庁、文部省、郵政省、国土交通省）

航空宇宙委員会（打上げ認可）

日本宇宙航空開発機構（ロケット・衛星の開発予算の執行管理、ロケット・衛星の運用、射場管理）、三菱重工（液体ロケット）、石川島播磨（液体ロケット部品、固体ロケット）、川崎重工（フェアリング、射点）、三菱電機（人工衛星）、東芝・日本電気連合（人工衛星）、大阪府中小企業（人工衛星）

当面は、日本宇宙航空開発機構の企画したロケット、人工衛星の開発・製造・打上げ、国際宇宙ステーションの日本実験棟での無重力下の実験、曝露部での真空下の実験等が日本の宇宙開発ビジネスであろう。宇宙開発技術者を目指す場合は上述する組織体制を踏まえて就職先を選択して欲しい。

## 終わりの言葉

小生の若い頃の学会は、日本造船学会、関西造船協会、西部造船会の構成で、日本造船学会の主要会員から、関西造船協会の論文は学术论文ではないと陰口をたたかれていました。そもそも造船工学は学問ではなくて造船術と言うべきもので、おかしな指摘だと思っていました。関西造船協会の講演会は造船所が主体で、学術サロンの雰囲気でした。この海友フォーラム懇談会も昔の関西造船協会の雰囲気を醸し出しているように感じております。

哲学者の三木清が「概念は経験を通して、経験は概念を通して理解される。」、「完全なる記憶が概念の理解を助く。」と書いています。フォン・カルマンの父のブタペスト大学の教授は息子に「理論は矛盾の無いことで成り立っている。真実かどうかは神のみぞ知る。」と言ったそうです。

物理学者の随筆で、電線に風が当たって生ずる鳴音をカルマン渦によるものと記述がありました。その後も、潜水艦の潜望鏡での鳴音でも同じ記述でした。然るに、音響学で示される音響テンソルには渦度は含まれておらず、圧縮応力とせん断応力である。言われてみればなるほどですが。実は本質を理解せねば先には進めない。流体力学も他の学問から見たら、もっと本質が見えるかもしれませんね。我々老耄も、老耄だからこそやれる創造的なことがあると思います。皆様のご健闘をお願いします。