セーフウェア

システム安全とコンピュータ

松原 友夫
松原コンサルティング

なぜセーフウェアの翻訳に関わったか
自己紹介を兼ねて (1)

- ソフトウェア開発を始めた頃のプロジェクトが比較的高リスクだったため安全に関心を持った
  - ある揚水発電所の水撃現象の計算 (1960)
    - 揚水中に停電になると導水管内に衝撃波が生じて管を破壊するが、それを緩和する装置の設計計算
  - ある電力会社向け、電力負荷配分システム (1965)
    - 毎日毎時の需要パターンに基づいてエネルギー源の最適配分を計算しそれに基づいて発電所網を稼働させる
  - ある都市銀行のオンラインシステム (1967)
    - 厳しい要求：営業中の無停止、1時間9万通の処理能力、
    - 高い革新性：手作業からコンピュータ、機械式から電子式へ
- 当時からあまり進歩していないのではないか
  - 類似の事故が繰り返されている

なぜセーフウェアの翻訳に関わったか
自己紹介を兼ねて (2)

- 著者のNancyさんをよく知っていた
  - Nancyは10th ICSE in Singapore (1988)で私がchairをしたmiscellaneous sessionの発表者の一人だった
    - 当時NancyはUC Irvine, Software Engineeringの学生
- システム安全に関するSoftware Integrity Levelsの国際規格を審議するJTC1 SC7/WG9のメンバーだった
  - 審議の中で”SAFEWARE”の内容を頻繁に参照した
- 電通大 西康晴先生から誘われた
  - 先生からの強い要請で監訳まで引き受けてしまった

システム安全についての私の関心

- 安全は蓄積し伝承すべき技術
  - しかし、うまく伝わっていない
  - 世代交代に伴って断絶が起きた
- 複雑なシステムの難しさ、怖さが理解されていない
  - 安易なスケールアップが横行
    - 複雑さは3乗で増加する
  - 身に付ける場が少ない
    - 私の場合、神奈川工場の方式設計部がその場だった
- 信頼性＝安全性と考えている人が多い
- 関心が開発・生産に偏っている
- プロダクト指向が強すぎる
  - 安全はプロセスの影響が大きい

「セーフウェア」について

- システム安全を体系的にまとめた書
  - 関連する幅広い専門領域を採り上げている
  - 現在の状況やアプローチを網羅している
    - Nancyはデータ収集を含め5年かけてこの本を書いたそうだ
  - 類書は少ない
    - 1995年の出版に拘わらず価値を失っていない
  - 実際の事故事例に基づく記述が豊富
    - 事故事例を集めた付録が貴重
- セーフウェアという言葉について
  - システム安全には組織的な取り組みが必要なことを意味するNancy Levesonの造語

産業化社会における新たなリスク要因(1)

- 新たなハザードの登場
  - 過去に低減され除去されたハザードよりずっと影響範囲が大きく発見や除去が困難なものがある
  - まだ適切な対応策が確立していないものもある
  - 過去に学んだ教訓が生かせない
    - 例えばコンピュータの利用
- システムの複雑さの増大
  - コンポーネント事故からシステム事故へ
- 曝露の増大
  - より多くの人がハザードに曝されるようになった
    - 例えば、網（電力、通信、鉄道）の制御によって
- エネルギー量の増大
  - 高エネルギー源の発見と利用によって
    - 例えば原子力

産業化社会における新たなリスク要因(2)

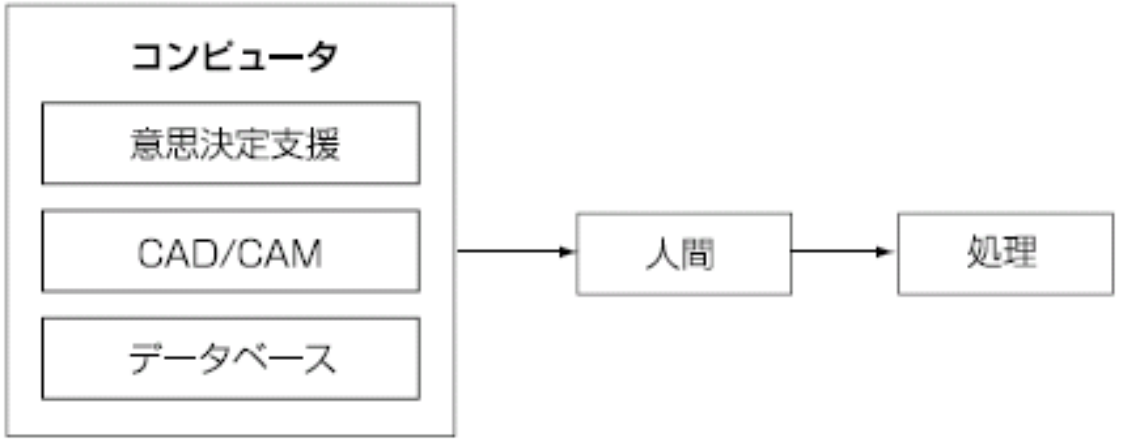
- 増加する手動操作の自動化
  - オペレータエラーのリスクを減らそうとした結果、保守、設計、監視など、より高度な意思決定にリスクがシフト
  - オペレータに責任が押し付けられてきた
- 集中化と規模の増大
  - 自動化は規模の増大と集中化を促進した
    - 原子力発電所の規模は増大の一途をたどる
    - タンカーの巨大化は制御可能な規模を超えている
      - 例えば、船員が、海と戦う意識を養う環境が失われた
    - フィーリングで制御するのは困難になった
- 技術的変化の加速
  - 経験から学ぶ機会が減る

いまや過去から学ぶのでは遅い

- 過去の事故から学ぶことが許されるか？
  - 特定の種類の事故が過去に起きなかったからといって、その種の事故が将来も起きないという保証はない
  - 事故から学ばねばならないのなら、1 つの事故が、受け入れ難いほどの悲劇的結果を招きかねないシステムに対して、われわれには何ができるのか
  - 起きてしまってからでは遅い
- リスク低減のためのシステム安全アプローチ
  - 事後の事故調査に頼るのではなく、事前のハザード分析で事故とその原因を予測することと、システムの寿命全体を通してできる限りハザードを除去又は制御することである

事故におけるコンピュータの役割

- クリティカルシステムにおけるコンピュータの利用段階
  - オペレータに情報やアドバイスを提供する
  - データを解釈し制御上の決定を行う人にそれを表示する
  - 直接コマンドを出すが人間が動作を監視し入力を提供する
  - 制御ループから完全に人間を排除する
- 間接的制御もリスクを伴う



ソフトウェアが制御するシステムの事故 (1)

- 事故調査はより困難になりコストが増加する
  - 故障している電子部品が残骸の中から見つかることはない
  - 微妙なエラーは簡単には見つからない
    - 1つのソフトウェアエラーでF-14を失ったとき、それを調査するのに数百万ドルかかった
    - 私も銀行システムで類似の経験をした
- クリティカルシステムで安全を確保する方法が追いついていない
  - 実績のあるエンジニアリング技法はソフトウェアを考慮していないし、それをソフトウェアに適合させるのは容易でない
  - ソフトウェア技術者と在来の技術者間のコミュニケーションもうまくいっていない

ソフトウェアが制御するシステムの事故 (2)

- 常に開発が先行し安全確保のための理論や手法は後に確立するのが常である
  - 例えば、1883年にニューヨークのイーストリバーに架けられた鉄鋼製吊り橋、ブルックリン橋
- 自動制御に依存しすぎるという新種の事故が増加している
  - 人は狎れやすい

システム設計者がおかす共通の誤り

- システム設計者の多くはソフトウェアの専門家ではない
  - ソフトウェアの理解が足りないシステム設計者の思いこみがシステム事故を招いている
- ソフトウェアをよく知らないシステム設計者がおかす共通の誤りをまとめたものが以下の「7つのソフトウェアの神話」である

ソフトウェアの神話 (1)

- 神話1：コンピュータのコストはアナログ機器や電気機械装置より安い
  - 表面的には正しいが、信頼性が高いソフトウェアを開発・保守するコストは膨大になることがある
- 神話2：ソフトウェアは簡単に変更出来る
  - 表面的には正しいが、エラーを組み込まずに変更するのは難しい
- 神話3：コンピュータは置き換えた電気機械装置よりも高い信頼性を提供してくれる
  - 「故障」はしないがバグのないソフトウェアを作るのは難しい
  - 長期間安定稼働していてもバグがないとは言えない

ソフトウェアの神話 (2)

- 神話4：ソフトウェアの信頼性が高まれば安全性も高まる
  - 仕様通りできていても安全ではない
  - コンポーネントが完全でも事故は起こる（事例は後述）
  - 安全性はシステムの特性であってコンポーネントの特性ではない
    - 欠陥のないブレーキが安全とは限らない
- 神話5：ソフトウェアを試験すること、または正しいことを証明することで、すべてのエラーが除去出来る
  - 安全性に関するソフトウェアエラーのほとんどはコーディングエラーではなく要件のエラーである

ソフトウェアの神話 (3)

- 神話6：ソフトウェアを再利用すれば安全性は高まる（次ページに実例）
  - 考慮されていない新たなシステム固有のハザードが事故を起こす
  - かえって安全性が低下することさえある
    - ソフトウェアの再利用が重大事故を招いた事例に事欠かない
- 神話7：コンピュータは機械式システムよりリスクが少ない
  - たしかにコンピュータは安全性を高める潜在能力があるが、現状ではそれを十分活かすに至っていない

神話6:再利用が安全性を損なった例

- Therac-20 の一部はTherac-25 に再利用されたが、Therac-25 によって少なくとも2 人が死亡した原因と同じエラーがTherac-20 にもあった。そのエラーは、Therac-20 においては時折ヒューズが飛んでしまうだけで、過剰照射という重大な結果を引き起こすことはなく、そのためにエラーが検出されることも修正されることもなかった。
- 米国の航空管制で長年にわたって順調に利用されていたソフトウェアが英国で再利用されたが、うまくはいかなかった。米国人開発者は経度0 度の扱いを考慮していなかったのである。その結果、そのソフトウェアはグリニッジ子午線に沿って英国を折りたたみ、ノリッチとバーミンガムが重なるようなことになった。
- 北半球向けに作成された航空用ソフトウェアは、南半球で使用された時に問題が起きることがよくある。さらに、米国のF-16 型機用のソフトウェアがイスラエル機で再利用され、高度が海抜高度よりも低い死海上空を飛行していた時に事故が起こっている。
- Ariane-5の打ち上げ事故では、Ariane-4から再利用されたソフトウェアの不要になった機能が災いしてブースターを止めたのが原因。

これらの事故は再利用だけが原因ではない

- 例えばAriane-5の事故は
  - 直接原因は浮動小数点様式で受信したデータを整数様式で変換した時のオーバーフロー
  - オーバーフローする数値は物理的にあり得ないとしてチェックから除外
  - その機能は打ち上げタイムシーケンス上Ariane-4では必要だったが5では不要だった
    - つまり、不必要な機能がエラーを起こした
  - 原因を構成管理不良と見る人もいた
  - 物理的にあり得ないからチェックから外した、という説明に疑問を感じた
- 救いは、Ariane-5が実験機だったことと、詳細な事故報告がwebに公開されたことだ

ソフトウェアを工学的に扱うのは難しい

- 複雑である
  - 「残念ながら、人間は複雑さにほとんど対処できない」 -- G.F. McCormick
- 離散状態システムである
  - 連続関数の扱いと比べて十分理解されているとは言えない
- コンポーネント間のインターフェースが見えにくい
- 柔軟性の呪い
  - 「柔軟性は後知恵の墓場」 -- John Shore
  - 課せられるべき自然法則や物理的制約がないので、甚だしく複雑なシステムの構築を極めて容易にする
    - 「仕様はすぐに欲しいものリストになってしまう」 -- .G.F. McCormick

事故原因の複雑な関係

- 事象の複雑な関係

「 バルティックスターという大型船が全力で航行中に、濃霧のためストックホルム付近のある島の海岸に座礁した。ボイラーの１台は壊れており、操舵システムの反応は遅く、羅針盤は調整不良状態で、船長は電話連絡のために船内へと降りていき、船首にいた見張りは休憩中で、水先案内人は舵を握っていた船員に英語で間違った指示を出していた。その言葉は聞き取りにくく、ギリシャ人にしか分からない言葉だった。」

ル・モンド紙に掲載された海難審判での調書の抜粋

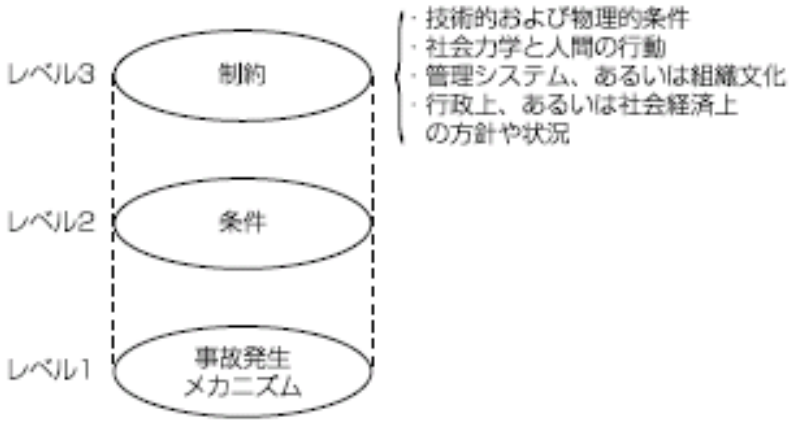
- 原因には必要条件と十分条件がある
  - 例えば、燃焼には可燃性物質、着火源、及び酸素が必要であり、個々の条件単独では原因にならない
  - 全部揃った場合が十分条件である
- 原因は、それぞれが必要条件であり、それらが揃えば事象の発生に十分である条件の集合によって構成される
  - 個々の条件を要因と呼ぶ

原因識別の落とし穴 ― 過度の単純化

- 法的責任追及の観点から過度に単純化される
  - 最も関係のある要因が無視されるので再発防止には役立たない
- オペレータに責任を押し付ける傾向が強い
  - オペレータエラーの蔭には設計エラーや調査不十分が隠れている
  - 「オペレータエラー」からは建設的な改善策は生まれない
    - 鉄道の連結事故はヒューマンエラーとされていた間は改善されなかったが、政府が介入し自動連結器の導入を要求したことで、事故は大幅に減った
- 機械の故障や直近の事象のみを重視する傾向がある
  - これは最も重要な要因の軽視につながる
- 組織的要因を軽視する
  - 組織的要因は大規模システム事故のほとんどで指摘されているが、組織内調査では無視または軽視される

因果関係の3階層モデル

- 事故原因の3階層モデル (Peter Lewyckyの提案)
  - レベル1は事故発生のメカニズム
    - e, g 運転手がブレーキを踏んだ、車が横滑りした
  - レベル2は事象が発生し得る条件または条件の欠如
    - e. g. 速度が速すぎる、路面が濡れている
  - レベル3は事故全般に影響を及ぼす根本原因
    - 識別し除去しなければ事故を繰り返す



事故の根本原因 (1)

- 安全文化の欠陥
  - 自信過剰と自己満足
    - スリーマイル、チェノブイリ、チャレンジャー、ボパールなど
  - リスクの過小評価
    - タイタニック号は、複数の事象の確率を掛け合わせた極端に低い確率で、世界で最も安全な船と自慢していたが、実際には事象が独立でなかった。これを「タイタニックの偶然の一致」と言う
  - 冗長性に頼りすぎること
    - e. g. チャレンジャーの１次、２次Oリング
  - 非現実的なリスクアセスメント
    - Therac-25のアセスメントではソフトウェアに10^{-4}の確率値を割り当て計測できない因子は無視された
  - 低確率で苛酷な事象の無視
  - ソフトウェア関連リスクの過小評価
  - 早期の警報や兆候の無視

事故の根本原因 (2)

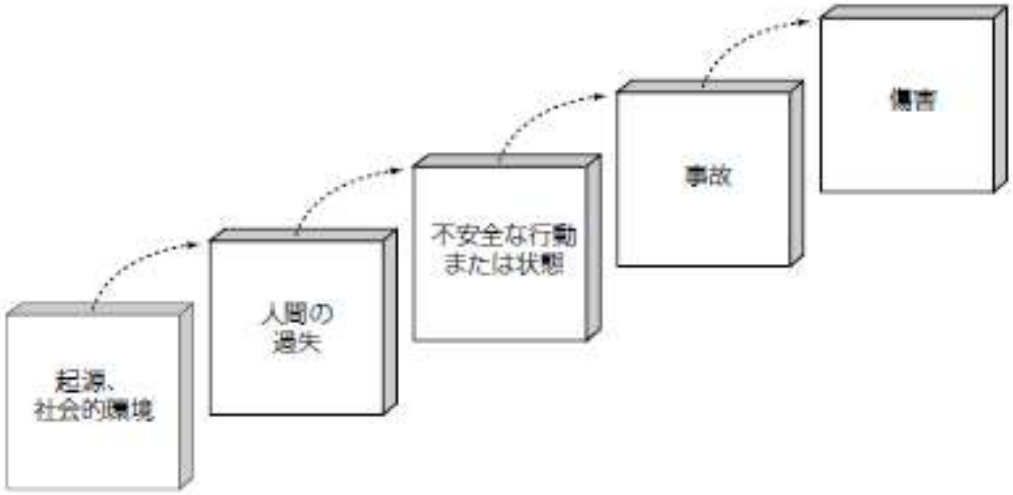
- 安全に低い優先順位を割り当てる
  - 安全関連予算の割り当てが経営者からの安全へのメッセージ
  - チャレンジャー事故調査報告は、NASAの責任部署の20人のうち1人の25%だけが安全関連の仕事をしていたことを指摘した
  - JR西日本では安全よりも業績と体面を優先していたようだ
- 相反する目標への誤った解決
  - ほとんどの事故の背景には目先のビジネス目標の優先がある
- 効果的でない組織構造
  - 責任と権限の分散
    - 例えばチャレンジャー事故のOリングについての責任
  - 独立性の欠如と安全担当部門の低い位置
  - 限定された情報伝達経路と貧困な情報の流れ

事故の根本原因 (3)

- 効果的でない技術活動
  - 表面的な安全活動
    - 形式的な記録
    - 指摘してもフォローアップされない
    - 官僚的な業務
  - 有効でないリスク制御
    - 事故原因のほとんどは、事故を防ぐための知識がなかったからではなく、知識の使い方を知らないために起こった
    - ソフトウェアを安易に追加または変更することで複雑さを加えリスクを増やすこともある
  - 変更に対する評価の失敗
  - 情報の不足
    - 類似の悲惨な事故の防止に役立つ情報は、容易に入手できない
- こうした組織文化は容易には変わらない
  - 変える努力が外から見えない限り恐らくリスクは残る

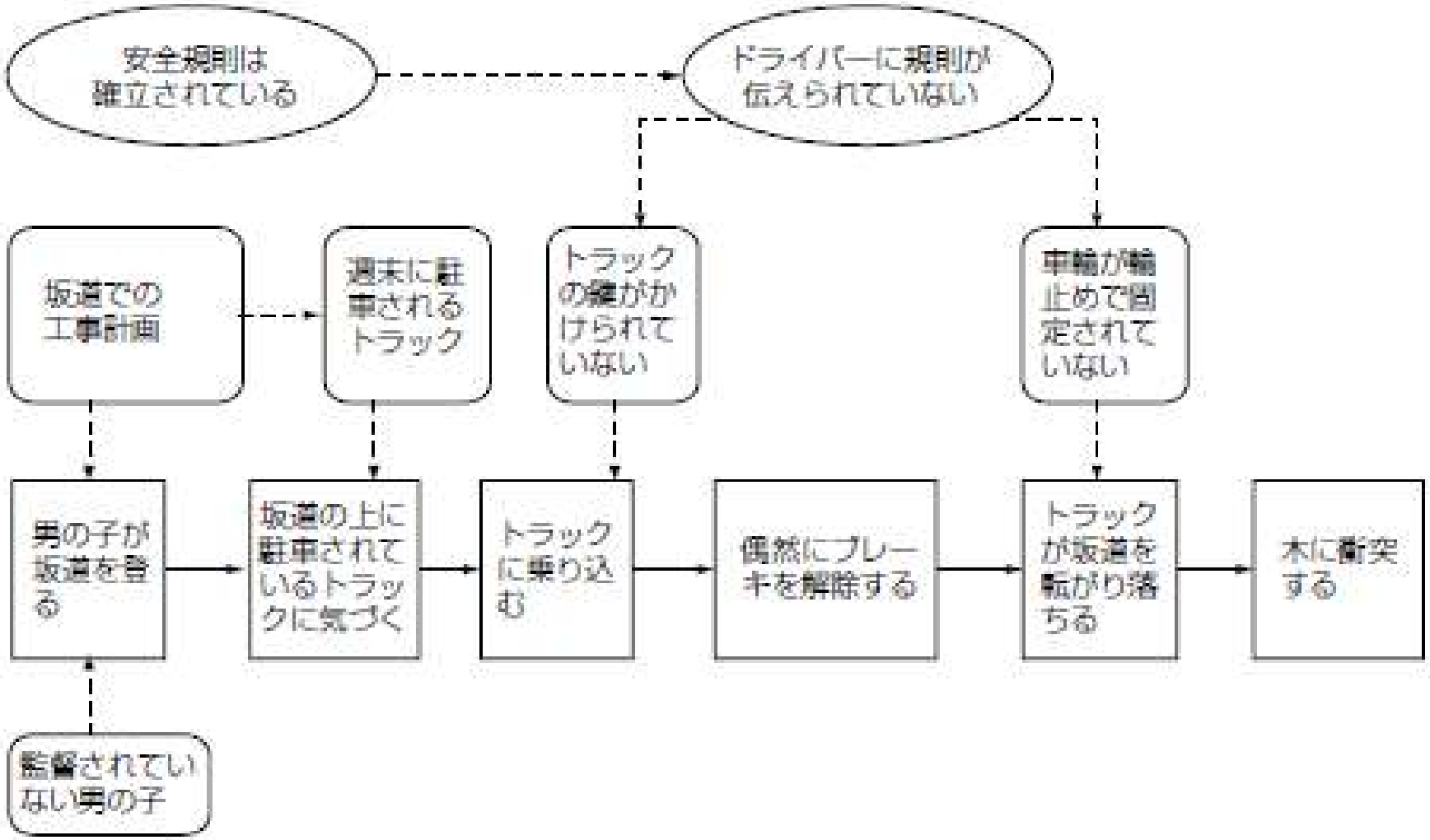
事故モデル

- 古典的モデル
  - エネルギーモデル
  - Heinrichのドミノモデル



  - 全米安全評議会モデル
  - 疲学的モデル
- 事象連鎖モデル
  - 摂動(perturbation)モデル
  - INRS(フランス国立安全研究所)モデル
  - MORT (Management Oversight and Risk Tree)モデル

MORTモデルの例


安全規則は
確立されている
ドライバーに規則が
伝えられていない
坂道での
工事計画
週末に駐
車される
トラック
トラック
の鍵がか
けられて
いない
車輪が輪
止めで固
定されて
いない
男の子が
坂道を登
る
坂道の上に
駐車されて
いるトラッ
クに気づく
トラック
に乗り込
む
偶然にブレー
キを解除する
トラック
が坂道を
転がり落
ちる
木に衝突
する
監督されてい
ない男の子

ヒューマンエラーの位置づけ

- 大部分の事故の原因はオペレータにあるという一般的な仮説は正しいか？
  - ハインリッヒは88%がオペレータにあると主張した
  - しかし、統計データは額面通りには受け取れない
    - データには偏りがある
    - プラスの行動は記録されない
    - オペレータはすべての緊急事態を克服出来るという前提に基づいて非難される
    - オペレータはしばしば極限状態で介入せねばならない
    - 後知恵なら何とでも言える
    - オペレータエラーと設計エラーを分離するのは不可能に近い
- 「ヒューマン（オペレータ）エラー」はシステムの改善には役に立たない用語であり「人間とタスクのミスマッチ」という言葉に置き換えるべきだ -- Rasmussen

ヒューマンエラーの意味

- ヒューマンエラーという用語は一般に次の2 つの意味で使われる。
  - 人間が悪いことと知っていたはずの何かをした
  - 人間が、その時点では悪いことだとは知らず、振り返って悪かったことが分かる何かをした
- だが、この区別は、事故を減らすことより、非難や罪を着せようとする場合に限り意味がある
- Trevor Kletz
  - 「ほとんどすべての事故はヒューマンエラーのせいにすることができるが、そうすることは事故の予防に役立たない」
  - 「この言葉は、今後の事故をどうやって防ぐかについての建設的な考えを妨げる」

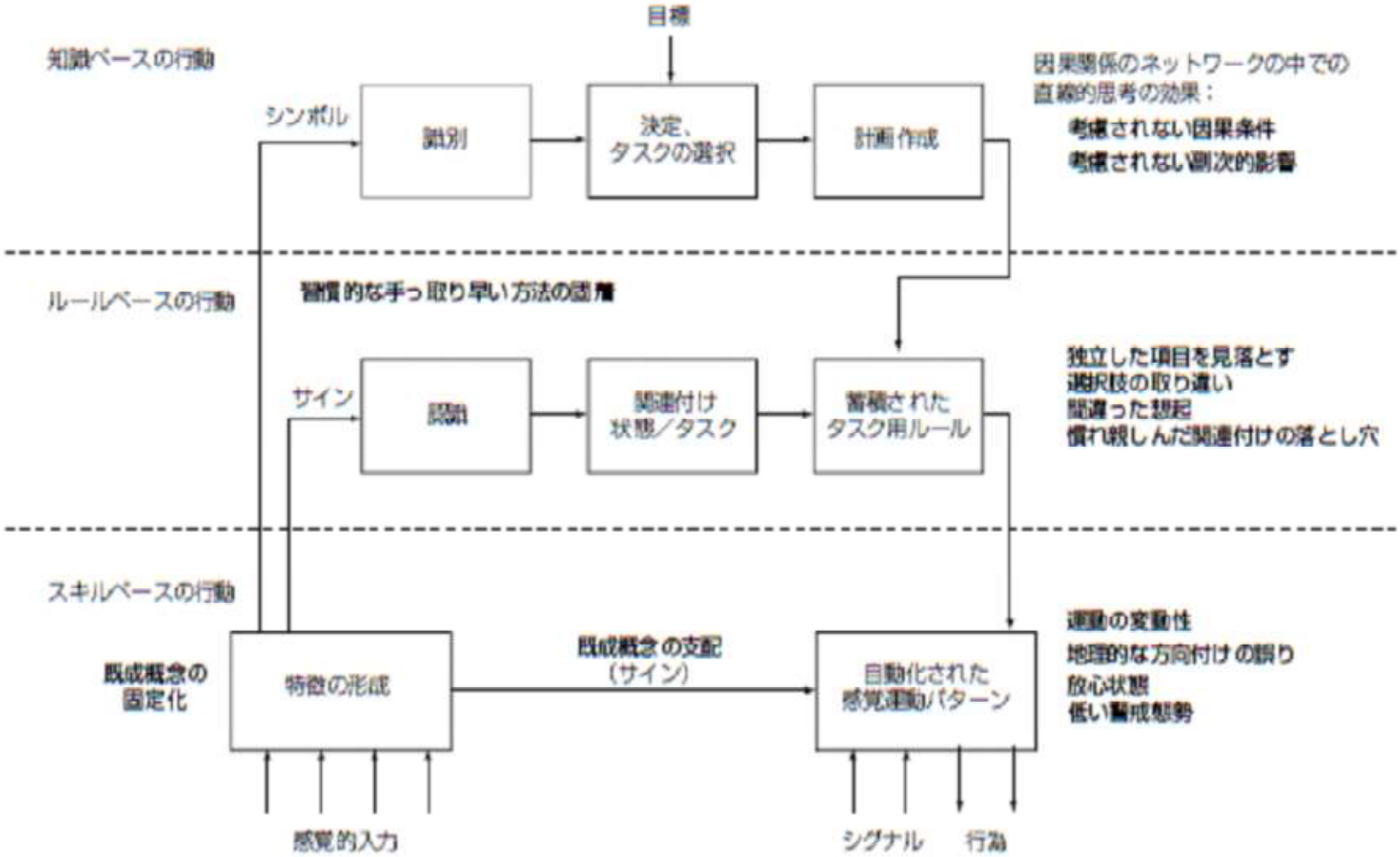
予想しない事態を克服するのは人の能力

- 人間が誤りをおかすという特性と同じ人間特性が、人間の計画プロセスの中では肯定的特徴として表現されることがある
  - 例えば、過去の規則性をモデル化してそれらを未来に適用するという人間の驚くべき能力、と言い直すことができる。人間は、この能力によって確実に未来を予測することができる
  - ある状況でヒューマンエラーをおかすものは、別の状況では人間の創意工夫の才であるかもしれない
- ヒューマンエラーは人間の適応能力と創造性の不可避的な副作用なのであり、それは技術的構成要素の故障とは全く異なる

ヒューマンエラーは役に立たない区分

- Rasmussenの3レベル認知制御モデル（次ページに図）
  - スキルベースの行動
    - 行動はフィードフォワード制御に基づく
  - ルールベースの行動
    - よく分かっている問題の意識的解決
  - 知識ベースの行動
    - 制御者が制御のためのノウハウや以前の経験から制御に役立つ制御のためのルールが存在しない環境に直面した時、行動の制御は目標制御的で知識に基づく概念的レベルの高みに移行していく。この状況において、計画は、異なる計画が検討され、目標に対して効果が試験された上での選択によって、物理的な試行錯誤によって、または、環境の機能的特性の概念的理解と検討中の計画の効果予測によって、策定される。

Rasmussenの認知制御モデル



認知制御モデルの意味

- スキルベースの行動
  - 組織文化
  - スポーツ選手の行動
- ルールベースの行動
  - マニュアル文化
  - 応用動作を制約する
  - いわゆるマニュアル人間を生む
- スキルベースの行動
  - 前例のない事態への対処には必須

自動化システムにおける人間の役割

- 監視者としての人間
  - 人間は自動化のシステムの監視が苦手
    - 例えば、積極的な行動を要求しないタスクは警戒レベルを下げシステムに過度に依存するようになる
- バックアップとしての人間
  - 下手に設計されたシステムはオペレータを未熟で介入を嫌う人として扱う
  - 人間が介入する適切な手段を持たない自動制御システムではエラーを拡大しかねない
- パートナーとしての人間
  - エラーの可能性は増加する
    - 設計者がどのように自動化すればよいかを考え出せなかったタスクが割り当てられる
    - 残りのタスクは著しく複雑になる
    - 自動化で容易な部分を取り去る
- いずれも一長一短 ― 解決の方向は
  - オペレータのことを最初から考えて設計する

安全への取り組みの歴史

- 産業革命時代は事故のリスクはすべて労働者が負った
- 労働者の社会的運動が世論を喚起した
- 次第に法律により保護されるようになった
- 1914年に最初の安全規格が米国で発行された
- 1929年にハインリッヒ論文が書かれた
- ハインリッヒの仮説は労働者の不注意に注目を集めた
- ハインリッヒは最初にドミノ理論を提唱
- WWIIは訓練中の事故は戦闘時の２倍以上に及んだ
- WWII後、製品と開発プロセスに安全を組み込む安全プログラムが始まった
- しかし、「事故が起きてから対策する」取り組みだった
- 事故の潜在的影響が増大し、システム的見地からの取り組みが始まった

システム理論とは (1)

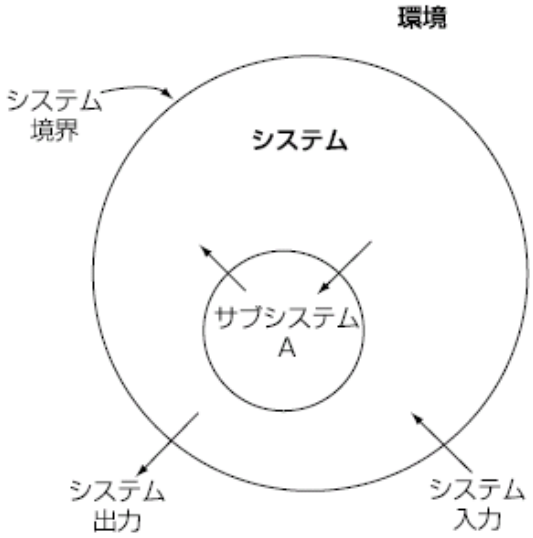
- なぜ生まれたか
  - システムの複雑性の増加には従来の科学では対処できない
  - システム理論は科学的還元主義の補完または反発として生まれた
- システムは3つのタイプがある
  - 体系的な単純さを提示するもの
    - システムは相互に作用し合わない部分に分解して分析できる
  - 体系的でない複雑さを提示するもの
    - 還元主義が有効な構造が欠けている
    - 集合として扱うことができ、挙動を統計的に扱えるほど規則的である
  - 体系的な複雑さを提示するもの
    - 完全に分析するには複雑すぎ、統計として扱うには体系的すぎる

システム理論とは (2)

- 主な適用領域
  - 第二次大戦後に設計された複雑なシステム
  - 生体システム、生態システム、社会システム
- 体系的複雑さを持つシステム
  - 還元主義では複雑過ぎて説明できない
- 創発特性(emergent property)
  - ある与えられたレベルの階層において、そのレベル固有の特性（創発特性）は下位レベルに還元できない
    - リンゴの形は下位レベル（細胞）での描写は意味をなさない。与えられた複雑性のレベルにおいて、そのレベル固有の特性は還元できない
  - 安全性はシステムの創発特性
- システム理論では個々の部分ではなくシステムを全体として扱う

システム理論とは (3)

- 用語定義:
  - システム:共通の目標または目的を達成するために、全体として一緒に行動する構成要素の集まり
  - システムの状態:その時点で関連する特性の集まり
  - システム環境:全体としての行動がシステム状態に影響を及ぼすような構成要素とそれらの性質の集まり
  - 入力/出力:システムと環境の境界を出入りするもの
    - LehmanのプログラムE進化論におけるE-Typeもシステムとして扱うことができる



システム安全の基本概念

- 完成した設計に安全を組み込むのではなく、設計に安全を組み込むことを重視する
- サブシステムや構成要素としてではなく、全体としてシステムを扱う
- ハザードを単なる故障より広い意味で捉える
  - 故障がないコンポーネントも安全解析の対象とする
- 過去の経験や規格よりも分析を重視する
- システム安全では、定量的手法よりも定性的手法を重視する
- システム安全では、システム設計におけるトレードオフと対立を重視する
- システム安全が扱う範囲はシステム工学より広い
  - 政治的社会的プロセス、管理者設計者オペレータの態度や動機、法律、許認可、世論など

ソフトウェアのシステム安全 (1)

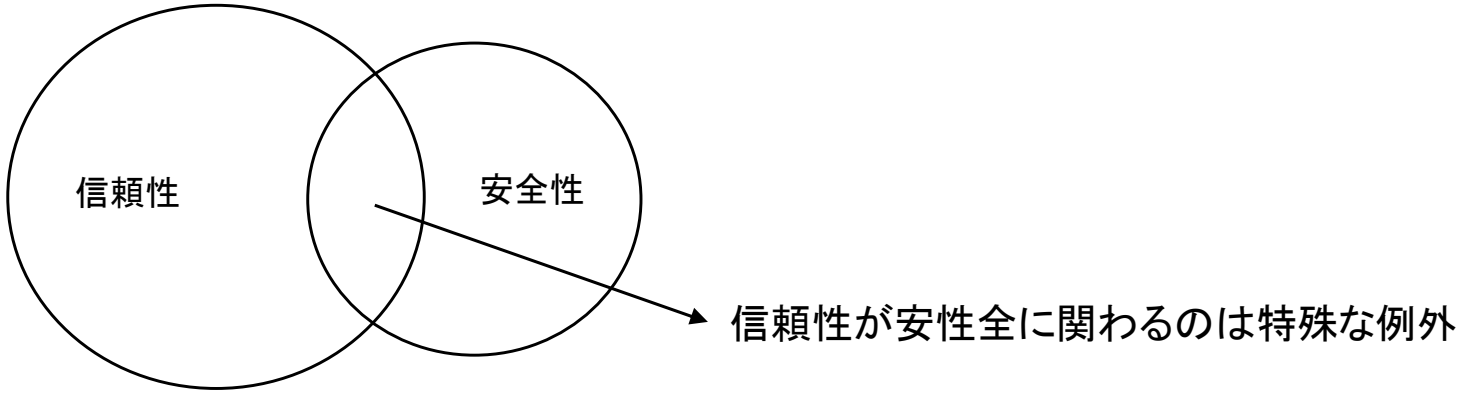
- ほとんどの事故はコンポーネント間のインターフェースと相互作用が原因にもかかわらず
  - つまり、ソフトウェアはシステム安全に直接的な役割を果たしているにもかかわらず
- システム安全技術者とソフトウェア技術者の間に深い溝やズレがある
  - システム安全技術者の一般的傾向
    - ソフトウェアを無視するかブラックボックスとして扱う
  - ソフトウェア技術者の一般的傾向
    - コンピュータを刺激⇔応答システムとして扱う
    - コンピュータの向こう側のことを思い描こうとしない
    - システムハザードへの影響を考慮に入れずに作る
  - 両者間のコミュニケーションは乏しい

ソフトウェアのシステム安全 (2)

- ソフトウェアの安全に関わる用語の定義
  - ソフトウェアシステム安全
    - ソフトウェアがハザードに寄与することなくシステム状況の中で実行されること
  - セーフティークリティカルなソフトウェア
    - 直接または間接にハザードをもたらすシステム状態につながるあらゆるソフトウェア
  - セーフティークリティカルなソフトウェア機能
    - 他のシステムコンポーネントの動作、または環境条件と共同して、直接または間接にハザードをもたらすシステム状態の存在につながるようなソフトウェア機能
- 安全問題の大部分は要件のエラー
  - 正しく要件を実装しているがそれがシステムの見地から安全でない動作を指定している
  - 要件がシステム安全に必要な特有の動作を指定していない
  - ソフトウェアが要件の指定を超えて意図されない危険な動作をする

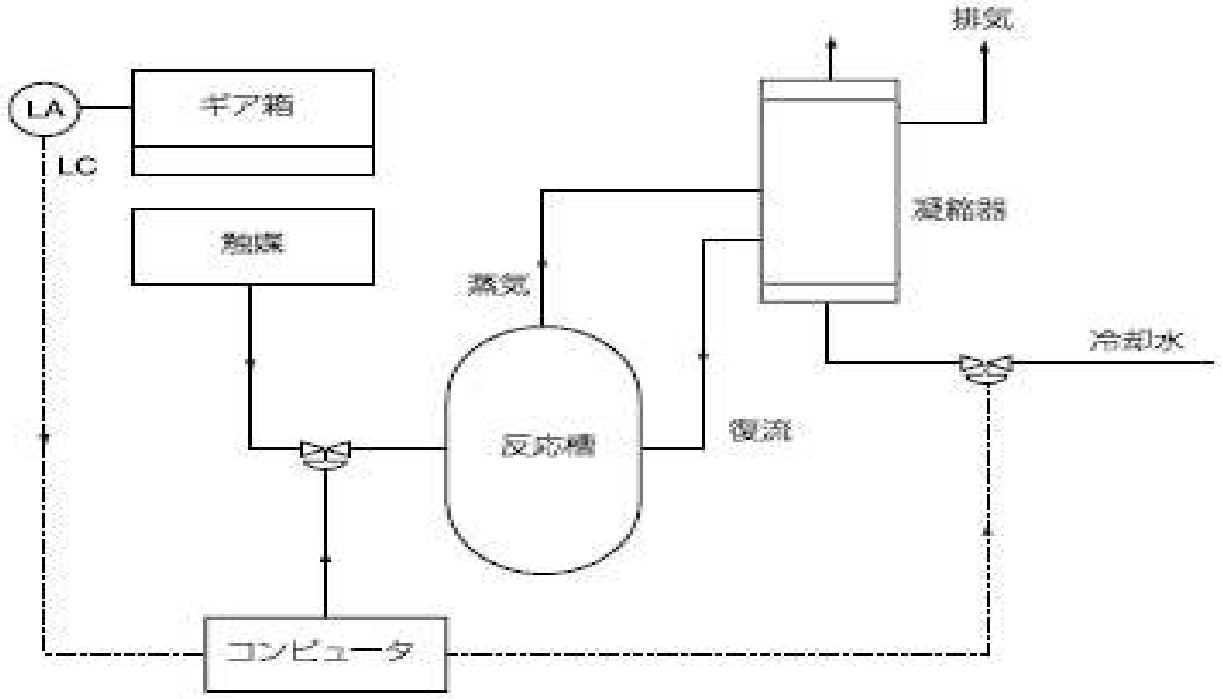
信頼性と安全性は別のもの

- しばしば信頼性と安全性は同じと仮定されるが、この仮定は特殊な例外でしか当てはまらない
- 信頼性の定義
  - あるコンポーネントが与えられた期間と指定された条件の下で求められた機能を実行する確率
- 事故はコンポーネントの故障の組み合わせによって起こるわけではない
  - コンポーネントに故障がなくても事故は起きる（次の頁に例）
- 信頼性が高くても安全でないことも、それと逆のこともある



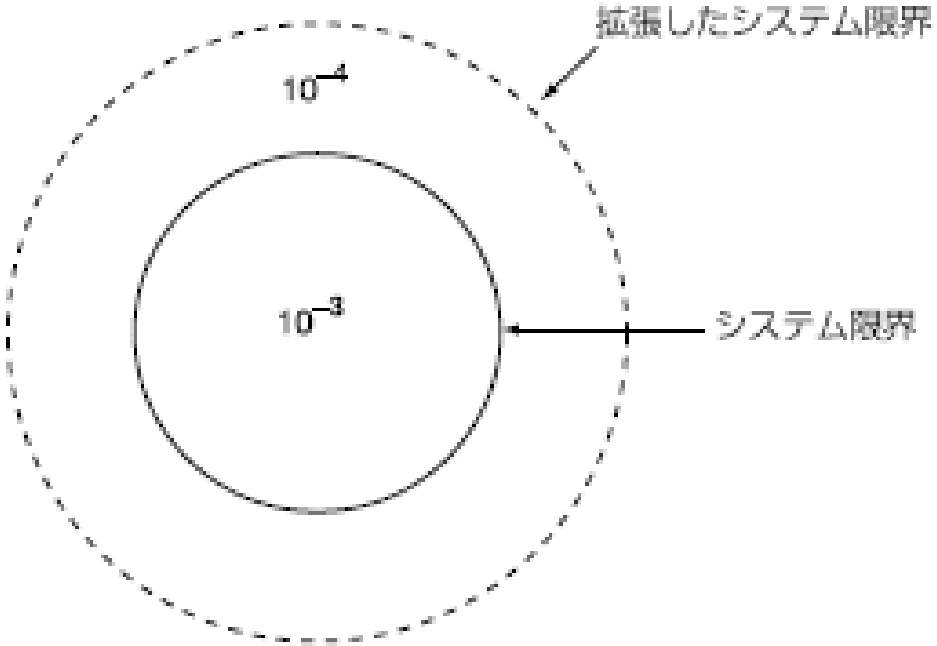
コンポーネントに故障がなくても事故は起きる

コンピュータは、反応槽への触媒の流入と、化学反応を冷やすための復流凝縮器への冷却水の流入を制御していた。さらに、コンピュータへのセンサー入力は、プラント内のどんな問題についても警告し、障害がプラント内で発生したら、すべての制御変数をそのままにして、警報を鳴らす仕様になっていた。
ある時コンピュータは、ギアボックスの潤滑油レベルが低くなっているという信号を受信した。コンピュータは、要件が規定した通りに反応した。コンピュータは警報を鳴らし、制御状態をそのまま固定した。偶然、触媒はちょうど反応槽に加えられており、コンピュータは復流凝縮器への冷却水の流入を増加させようとしていたところだった。そのため、流入率は低いまま保たれた。反応槽は過熱し、安全弁が開き、反応槽の内容物が大気に放出された。



信頼性評価には注意が必要 (1)

- 高信頼性を示す数値は安全を保証しないし、安全は高信頼性を必要としない
- 限定されたシステム境界（中央の円）内で冗長性なのでいくら信頼性を上げても、予想外の問題は防げない
  - 例えば、ヒューズの故障頻度は年間10^{-6}から10^{-7}だが、切れたときに面倒がって銅線で代用する確率は10^{-3}である



信頼性評価には注意が必要 (2)

- ばかげたリスクの見積もりの例
  - 最近まで、液化天然ガス研究における10^{-53}の事故確率というリスクアセスメントが、数字の記録としては最高記録だった。この記録は、核兵器の安全問題（通信回線上の特別な信号が、その意図なしに送られること）の確率が2.8×10^{-397}と計算されたため、破られた。墜落してくる飛行機に衝突される確率が10^{-7}から10^{-8}であるということを考えると、これらの計算値のばからしさは明らかだ。
- 多くの場合、事故を構成する複数の事象が独立だ、という仮定に誤りがある

安全関連の用語定義

- 事故：ある特定のレベルの損失を引き起こす、望ましくない計画外の事象
- インシデント：損失を伴わない（あるいは経度の損失を伴う）が、異なる状況の下では損失の可能性がある事象
- ハザード：システムの環境（または物体）における他の条件（または物体）とともに、必然的に事故（損失の事象）をもたらし得るシステムのある状態、または一組の条件
  - 潜在危険と訳すこともある
- リスク：①事故に至る可能性、および②ハザードの曝露、または継続時間と組み合わさったハザードレベル
- 安全：事故や損失がないこと
  - なお、著者は「ディペンダビリティー」という用語を以下のように批判している
    - 「複数の特性を1 つの抽象概念にまとめようとする試みは、見当違いと思われる。理解や制御を抑制するので、これらのグローバルな抽象化には何の利点もない」

典型的なハザードレベル

		ハザードの影響の分類			
		I 破局的	II 重大	III 軽微	IV 無視可能
ハザードの原因レベル	A 頻繁に起こる	I-A	II-A	III-A	IV-A
	B かなり起こる	I-B	II-B	III-B	IV-B
	C たまに起こる	I-C	II-C	III-C	IV-C
	D あまり起こらない	I-D	II-D	III-D	IV-D
	E 起こりそうにない	I-E	II-E	III-E	IV-E
	F 起こり得ない	I-F	II-F	III-F	IV-F

安全プロセス

- 一般的なタスク
  - システム安全は、機能を統合することとして考えられる。統合することで、特定の安全上の配慮がライフサイクルの初期に計画に組み込まれ、こうした配慮がシステム全体の設計と開発に統合され、この取り組みがシステム寿命を通して継続することを保証するからである。システム安全には、それ自体の知識体系とタスクがあるが、それと同時に計画全体に関連する安全性を調整する役割を担う。
- 実際のタスク
  - 実際のタスクはシステムや組織によって異なるので、「セーフェア」には多くの事例がかなり詳しく記載されている
    - チューリッヒ地下鉄道駅
    - 軍用兵器システム
    - NASAのスペースシャトル計画
      - チャレンジャー事故を契機としてすべての故障モード解析(FMEA)、クリティカルアイテムリスト(CIL)、及びハザード分析が見直されたが、それでもソフトウェアはないがしろにされているように思われる -- Leveson

ハザード分析プロセス (1)

- 定性分析と定量分析
  - 容易に、または合理的に定量化でる要因を重視し、設計エラー、建造上の欠陥、オペレータの誤操作、保守エラー、および管理上の欠陥など、予測や定量化が容易でない要因を無視または軽視する傾向があるが、これでは現実的なリスク見積はできない
    - 例えば、いくつかの確率論的アセスメントでは、装置の故障確率が10^{-7} または10^{-8} の範囲であることを重要視する一方で、同じ装置で10^{-2} または10^{-3} の範囲の確率で起こる据え付けミスや保守エラーを無視する

ハザード分析プロセス (2)

- ハザードの識別
  - 基本的な手法
    - What-if分析
    - タイガーチーム攻撃
    - イメージを浮かべる
  - ハザードレベル付け（前出）
    - 起こりやすさと過酷度によるマトリックス
    - これに基づいて優先順位を付ける

ハザード分析のモデルと技法 (1)

- 比較的ポピュラーなもの
  - チェックリスト
    - 経験からの教訓を伝えるのにはよいが、リストに載っていない項目の見落としを助長したり、リストが巨大化する欠点がある
  - ハザード指数（ダウ指数）
    - 変更の少ないプロセス向き
  - フォールトツリー解析 (FTA)
    - 図形的な体裁のため、システム全体の理解と分析に適している
  - イベントツリー解析 (ETA)
    - システム故障を定量化するのに使われるが、複雑なシステムでは適用が困難
  - 原因結果解析 (CCA)
    - クリティカルな事象から始めトップダウンで解析する。欧州で多用

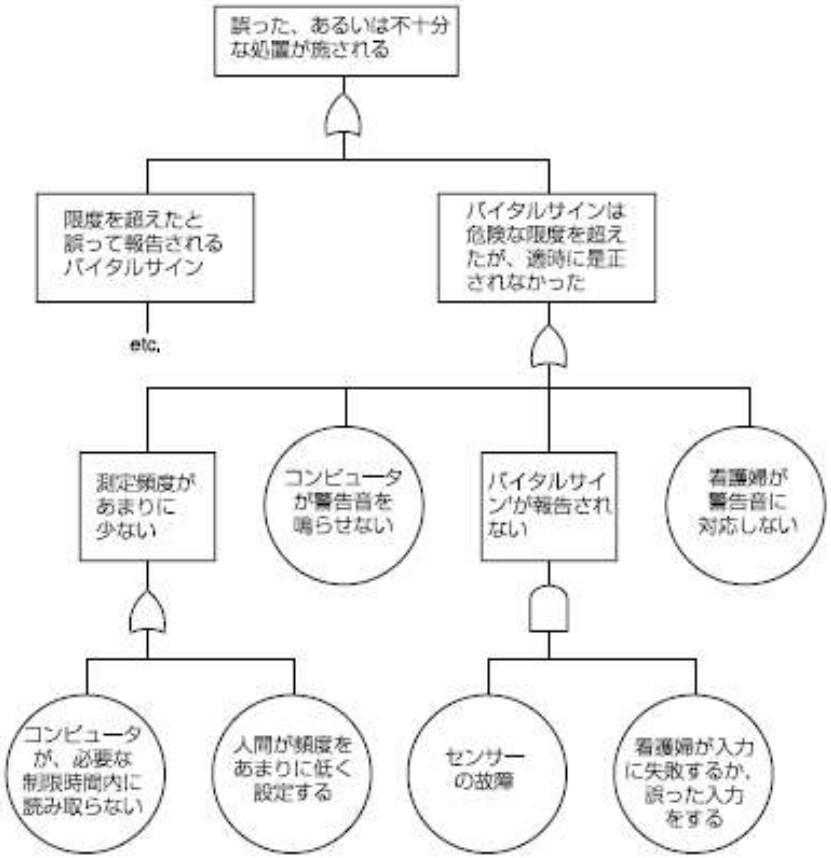
ハザード分析のモデルと技法 (2)

- HAZOP (Hazards and Operability Analysis)
  - 事故のシステム理論に基礎をおいた定性的分析法。隠れたハザードの顕在化に適している
- インターフェース分析
  - HAZOPに類似
- 故障モード影響解析 (FMEA)
  - 装置の信頼性を予測するために、信頼性技術者によって開発された。ハザードやリスクより、装置が良好に機能することを強調するために使われることが多い
- 故障モード、影響、および致命度解析 (FMECA)
- 障害ハザード分析
- 状態機械ハザード分析

- それぞれ利点と欠点があるので状況に合わせて選択する必要がある

ハザード分析のモデルと技法 (3)

- 患者監視装置についてのFTAの例



ソフトウェアハザードと要求分析

- ソフトウェアに関連する事故原因
  - 大部分は要件の欠陥
  - コーディングエラーは最も注目されるが安全性よりも信頼性などの他の品質に大きく影響する
- 考慮すべきこと
  - 頭の中のモデルと仕様モデルの意味的距離(semantic distance)を最小化する
- 要求分析のための完全性基準
  - ソフトウェアから見たプロセスと実際のプロセスのミスマッチを見つけ出す
- 堅牢さの基準
  - 堅牢であるためには
    - 起こり得るすべての入力に対して定義される挙動がなければならない
    - 任意の状態から生まれる個々の動作条件の論理和は、トートロジーを形成しなければならない
    - すべての状態には、所定の期間に入力がない場合を定義したソフトウェアの挙動がなければならない

安全のための設計

- ハザードを除去する設計
  - 置換
    - 可燃性物質から不燃性物質へ
    - 有毒物質から無毒物質へ
  - 単純化
    - 新たな技術と既存技術の新たな適用は、想像も予想もできない(unknown-unknown)事態をもたらすが、システムがより単純ならその機会は減る
    - Parnasは、ある原子力発電所の安全系のソフトウェアを6,000行のstraightforwardのコードで設計したが、英国の同等機能のソフトウェアは11万行であった
  - 分離(decoupling)
    - 延焼を抑える防火帯、高速道路の立体交差など
    - ソフトウェアでは、例えばモジュラー構造
  - 特定のヒューマンエラーの除去
    - ポインタ、制御移行、初期設定、グローバル変数などを避ける
  - ハザードをもたらす物質または条件の低減
    - 絶対に必要なコードだけを含める

ヒューマンマシンインタフェースの設計

- 一般的なプロセス
  - 使いやすさと安全性はしばしば両立しないので、一般的なHMI設計の指針をセーフティークリティカルシステムに適用する場合は要注意
  - クリティカルデータは多重入力を要求することになる
- 人間の特性への作業の適合
  - 「系統的なエラーと正しい動作はコインの裏表である」-- Reason
  - オペレータがエラーを犯したことを認識し、それを是正できるように設計する
- セーフティークリティカルなヒューマンエラーの低減
  - 安全を高める操作を簡単かつ確実にすることと、危険な行為を困難または不可能にすること
- 適切な情報とフィードバックの提供
- 安全なHMI設計のための指針
  - 人間の能力を置き換えるのではなく、それを高めるように設計する
  - オペレータを考慮することから設計プロセスを開始する
  - 設計の意思決定と安全解析にオペレータを参加させる

  など、章末に全部で60項目の指針がある

Nancyの結びの言葉

- セーフティクリティカルな機能のためにコンピュータを使用している人達は、本章で述べた技法に頼り過ぎないようにすべきである。
- すべては、安全性を保証する人たちの能力に大幅に制限される
- ソフトウェアシステムの安全性を高める最も実用的で効果的な方法は、ソフトウェア開発と保守の全般を通じて安全性を高める技法を適用する、という徹底的なセーフウェア計画に従うことである

終わりに

- 最近頻繁に身近に起きている事故を観察すると、システム安全という視点が欠けているように思える
  - この観点からの議論があれば嬉しい
- 我々は、システムというものの特性をもっとよく知る必要があるのではないか
  - システムを扱うことの怖さをもっと自覚すべきではないか

Nancy Levesonの略歴

- 現在、MITの航空宇宙工学部門と工学システム部門の教授。1995 年に「ソフトウェア安全分野の開発と、人命と財産が危機に瀕しているソフトウェア工学とシステム工学の実践と推進」の功績で米国航空宇宙学会より情報システム賞を受賞、1999 年には、ソフトウェア安全の創設などのコンピュータ科学研究の功績によりACMのAllen Newell 賞を受賞。
- 教授は、事故を防ぐ方法に関して、多くの産業で幅広く支援を行い、国内外の多くの研究委員会の委員、例えば、NASAの航空宇宙安全諮問委員会の委員、最近では、コロンビア号事故調査委員会の支援を行った。教授は、ガイシンガー電子医療記録安全協会の理事であり、創設者で共同オーナーであるセーフウェア工学株式会社の取締役でもある。
- 教授は、設計・運用・管理と社会的局面を含むシステム安全のすべての分野の研究を行なっており、最初はシステム工学、特にシステム安全、システム分析、人的因子、人と自動化の相互作用や、組織的安全などの分野に及んでいる。教授の研究結果や手法は、航空宇宙、交通運輸、化学プラント、原子力、医療機器など、安全に係わる多種多様な産業で応用されている。現在は、医療安全、医薬品安全、金融リスク管理などの新しい分野で、システム工学とシステム安全手法をどのように適用できるかを研究している。これらの研究に共通する要素は、複雑系に対して、システム思考を適用することである。