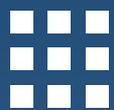




複雑システムのトラブル未然防止用先進 知識基盤の構築

○京都大学 吉川 榮和
東北大学 高橋 信
岡山県立大学 五福 明夫
宇都宮大学 松岡 猛

アルカディア・システムズ 新田 純也
京都大学 森下 和功
京都大学 安部 正高



背景と目的

電力システムのような大規模・複雑化した技術システムにおいては
トラブルの未然防止とトラブル時の速やかな運用復旧が重要な課題

I. 吉川ら(2010, ICONE18-29424):

- ・予防的なトラブル防止に貢献する知識基盤システム構築法を概念的に検討。
⇒原子力プラント運転保守支援用分散型システムの開発を視野



2011年3月11日東日本大震災、福島第一原発事故の発生

従来の原子力規制がなおざりにした、シビアアクシデント対策や原子力災害時
緊急対応策の導入が急務に。

II. 吉川ら(2015, STSS/ISSNP):

- ・IAEAの提唱する多重防護(DiD)コンセプトによるリスクベース多重防護対策
に関する知識基盤構成法を提唱

“複雑なエネルギーシステム運用保守のための先進的情報基盤高度化
に関する実験研究”(2022-2024、京都大学Ze研究拠点 共同研究)

III. 本発表では、上記のZE共同研究で得られた知見に基づき、I、IIを統合し、複雑な構
成の技術システムのトラブル未然防止用基盤知識の高度化を検討する



I. 吉川ら(2010)提案のフレーム要約

トラブル未然防止のための知識基盤構築法

H. Yoshikawa, and M. Yang, "Study on integrated method for constructing proactive trouble prevention knowledge base", Proc. ICONE18, May 17-21, 2010, Xi'an, China (ICONE18-29424)

1. トラブル知識の構造化: 細分化→原因と結果の連鎖に分解、一般化→抽象化のレベルを上げて汎化、**関係の抽出(下図)**を基本とする知識基盤のフレームを提唱

- ・当該故障を積極的に引き起こす
- ・詳細なメカニズムの知識

(a) どのように故障するか

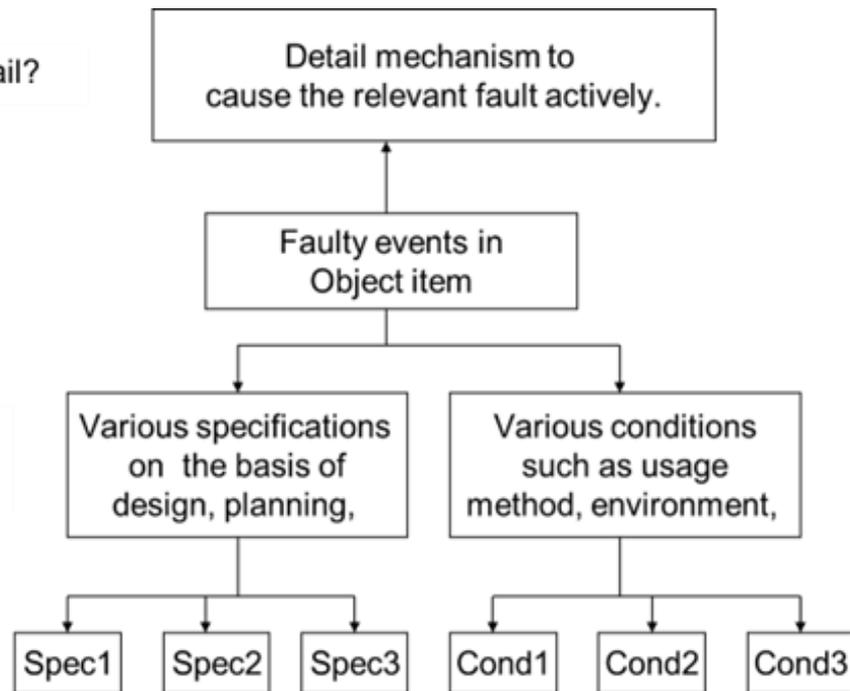
(a) How it will fail?

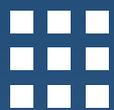
あるシステムに何らかのトラブル発生

(b) どのように故障を回避するか

(b) How you can avoid fault?

- ・システムを構成する機器の仕様の詳細な知識
- ・機器の使用方法、使用環境など
- ・トラブルの発生につながる条件の知識





I. 吉川ら(2010)提案のフレーム要約

トラブル未然防止のための知識基盤構築法

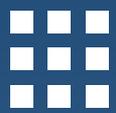
H. Yoshikawa, and M. Yang, "Study on integrated method for constructing proactive trouble prevention knowledge base", Proc. ICONE18, May 17-21, 2010, Xi'an, China (ICONE18-29424)

2. 予防的トラブル防止に係る5つの知識ベースからなる概念的フレーム

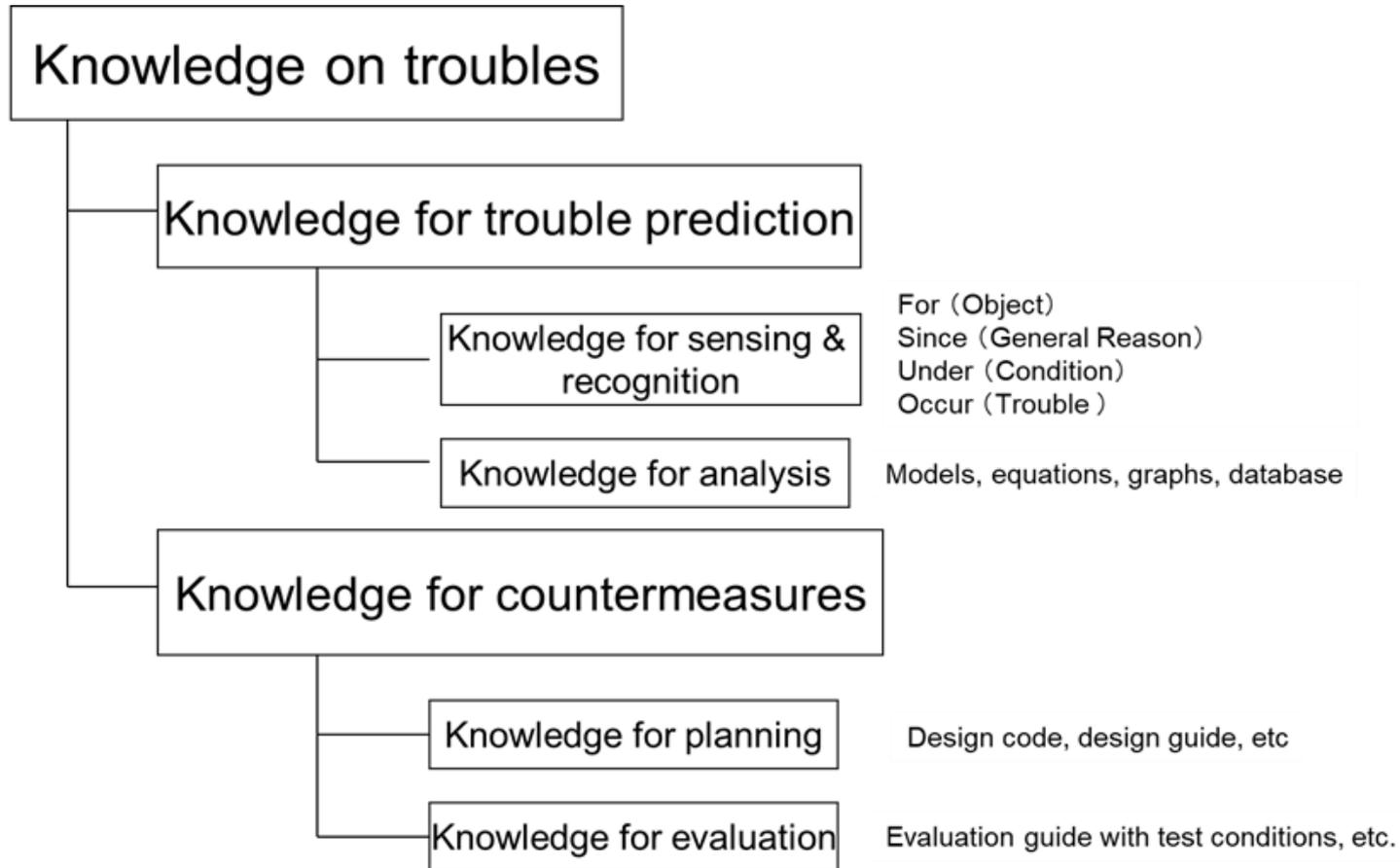
- A. トラブルの予測と対策に関する知識ベース
- B. オブジェクト項目に関する知識ベース
- C. ストレスー失敗生起メカニズムー破壊モードの関係に関する構造化知識ベース
- D. オブジェクト項目の仕様に関する知識ベース
- E. 構造化された知識ベースの獲得と活用のフローチャート

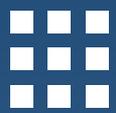
※オブジェクトとは: 複雑な構成と機能を持つ工学システム

・A. B. D. について概念的な構成を提唱(次ページ以降に示す)

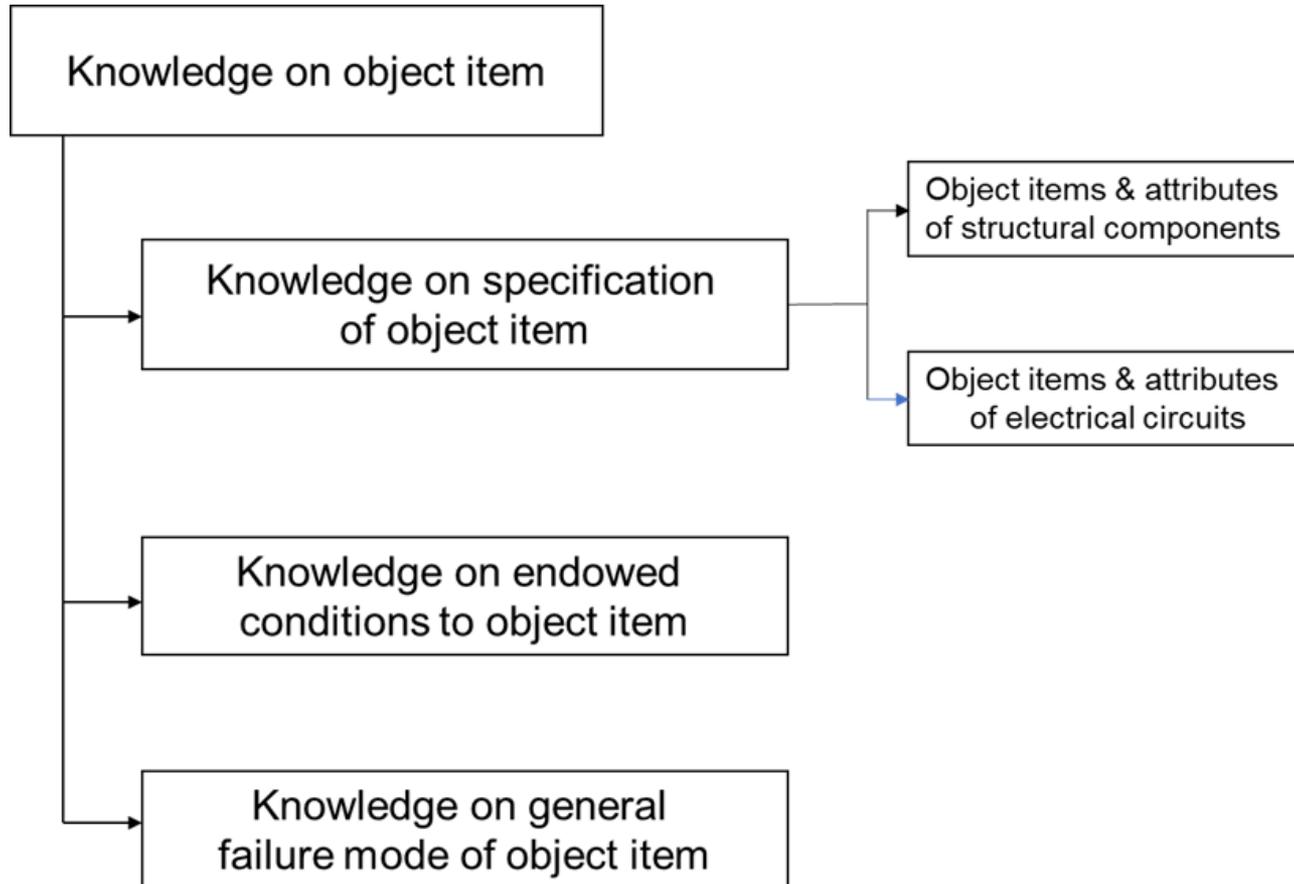


トラブルの予測と対策に関する知識ベース(A)の構成



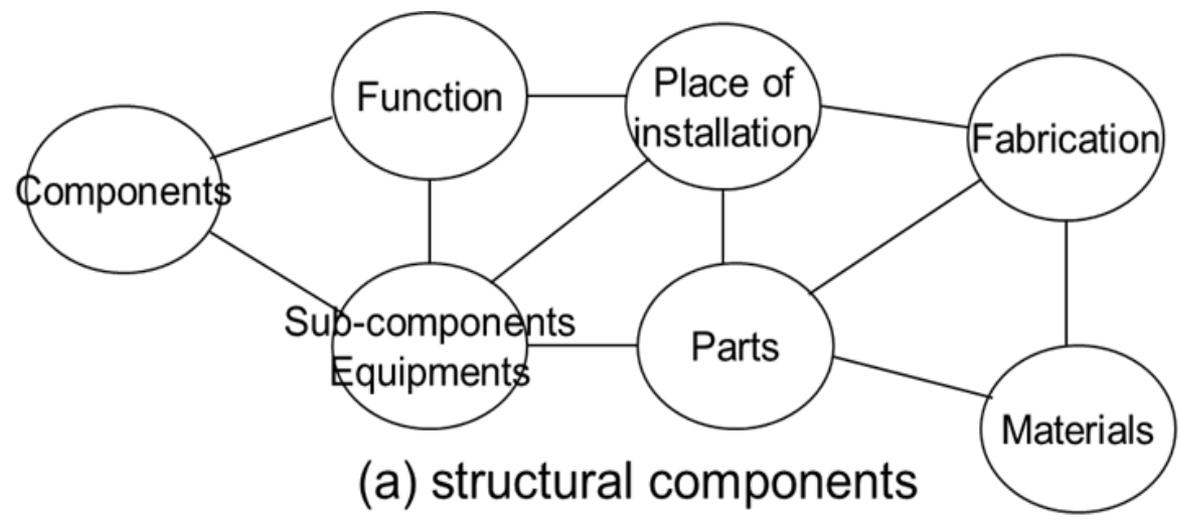


オブジェクト項目に関する知識ベース(B)の構成

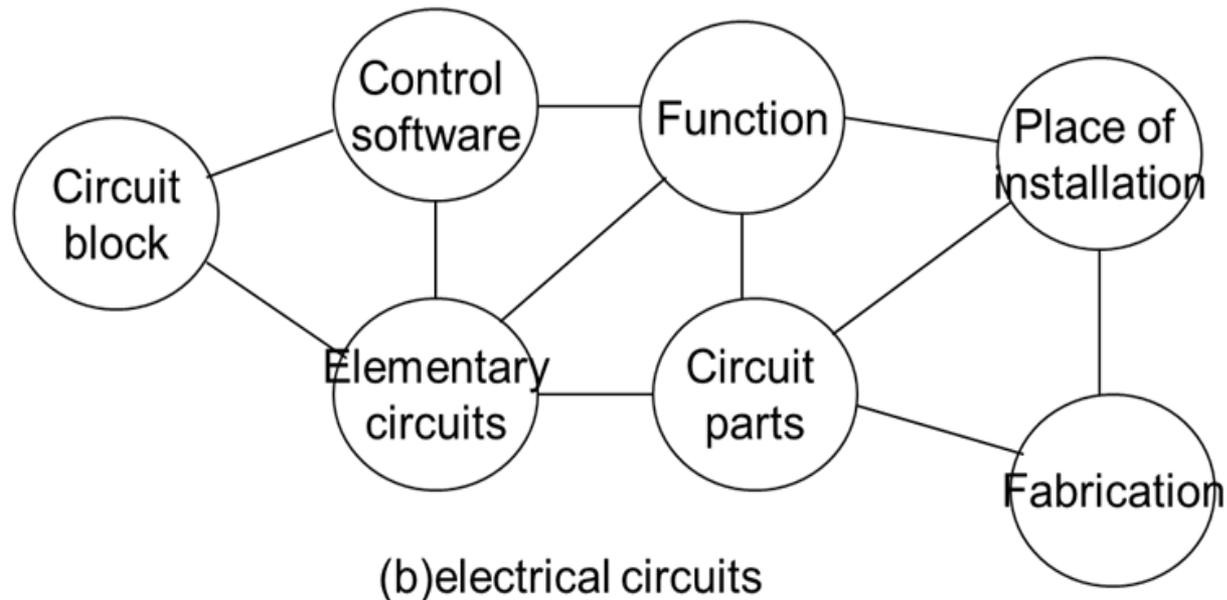




構造コンポーネントと電気・電子回路の仕様に関する知識ベース(D)



(a) structural components



(b) electrical circuits

II. 吉川ら(2015)提案の多重防護構造フレーム

IAEAの多重防護(Defense-in-depth: DiD)概念によるDiDバリアの知識基盤の定義

Yoshikawa, H., Yang, M., Zhang, Z.: "What should be level 5 defense layer in post-Fukushima nuclear safety, Proc. STSS/ISSNP 2015, Aug. 2015, Kyoto, Japan.

3. 第1と第2のDiDバリアの機能とリスク状態推定および関連シナリオの要点*

| | Barrier 1 DiD | Barrier 2 DiD |
|--------------------|---|---|
| 各 DiD バリアの機能 | 異常動作・前兆トラブルの 防止 | 異常動作の 制御 と故障の 検出 |
| DiD リスク状態推定と関連シナリオ | 定常運転、スタートアップ/シャットダウン、および定常運転とシャットダウン状態の両方におけるテストや、通常のプラント運転モードにおける さまざまな異常や故障の可能性の推定 。 | 左記のような運転モードにおいて、人工システムに何らかの 異常が発生した場合の各種リスク状態の推定 。 |

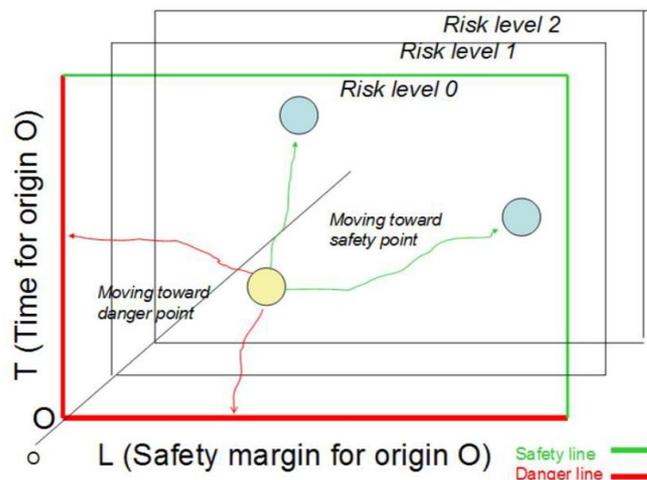
* IAEAの5層全体のDiD概念から第1層と第2層のみ示した。

II. 吉川ら(2015)提案の多重防護構造フレーム

4. 多重リスク平面によるDiD リスクモニターの提起

Yoshikawa,H., Nakagawa,T.: Development of plant DiD risk monitor system for NPPs by utilizing UML modeling technologies, IFAC HMS2016, Kyoto, Aug.30-Sep. 2, 2016,Kyoto, Japan.

Two stage visualization of dynamically changing risk



時間的に変動するリスク状態を

- ①2軸平面上の座標(損傷度、時間余裕)と
- ②そのレベルの重層化で表現。

レベル間の切り替わりをどのように設定するかは設計上の問題**、また、計測データから図中のリスクポイント(黄色の○)をどのように推定するかは計測制御、HMIの問題***

- Difference of risk level by different plane
Quantification of risk by two factors in the same risk level;
- Time margin to reach the point of no return
 - Degree of physical damage no more to be recovered

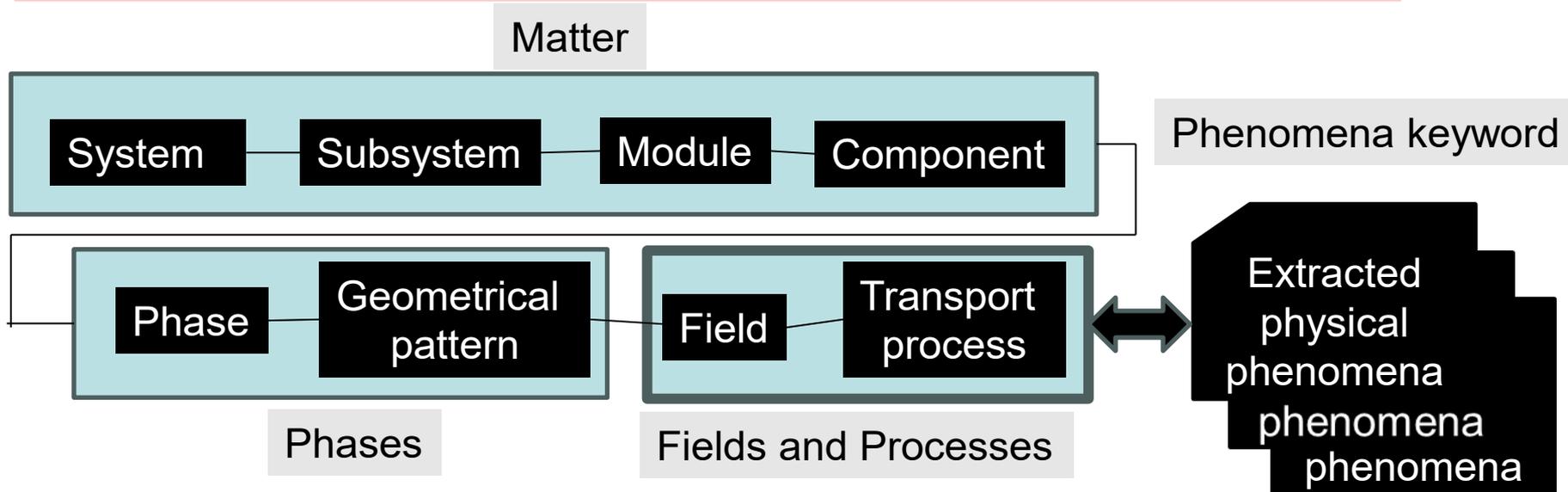
**福島事故後強化された日本の原子力規制基準に適合するべく、再稼働PWRでのシビアアクシデント防止のためどのように重層的なDiDリスクバリアが構成されているかの理解に対応

***プラント計装制御系全体をアナログからデジタル化する際のHMSモデルに関与

5. 対象プラントシステムの階層構造と物理現象モデルとの対応の表現

Yoshikawa, H.: Reinforced measures of severe accident prevention for restarting Japanese PWR after Fukushima accident, Nuclear Safety and Simulation, 7(1), July 2016

日本原子力学会の統計的安全解析の実施指針(2008)で推奨のEMDAP (Evaluation Model Development and Assessment Process) マッピングチャートの基本構造



EMDAPマッピングチャートは対象システムの知識ベースB,Dを導出し、対象システム内で生じる物理的現象の計測や予測に関わるモデルと対応させる知識ベースに関わるものである。詳細は避けるが、福島事故後安全性の強化された日本のPWRやAP1000の問題に対するシミュレーションでのプラントモデルにEMDAPマッピングチャートを用いている。

III. Ze共同研究をもとに知識基盤構築の検討

複雑なエネルギーシステム運用保守のための
先進的情報基盤高度化に関する実験研究(2022-2024)

ヘリオトロンJ(京都大学エネルギー理工学研究所)を対象とした実験研究をベースとした4つのサブテーマを実施

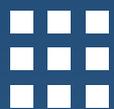
- ① 電気機器劣化の高調波診断システムの現場機器への応用
- ② 故障生起汎化知識による故障メカニズムの構造表現と現場応用
- ③ 照射脆化予測と原子炉圧力容器の劣化管理
- ④ 機能の概念と機能モデルに基づく運転支援

得られた知見を基に、吉川ら提案のフレーム(2010、2015)における、

C. ストレスー失敗生起メカニズムー破壊モードの関係に関する構造化知識ベース

E. 構造化された知識ベースの獲得と活用のフローチャート
多重防護コンセプトを取り入れた具体的な知識ベースの骨格

について、より具体的に検討。



Ze共同研究の成果

ヘリオトロンJ(京都大学エネルギー理工学研究所)を対象とした実験研究をベースとした4つのサブテーマの次のテーマについては

- ① 電気機器劣化の高調波診断システムの現場機器への応用
- ② 故障生起汎化知識による故障メカニズムの構造表現と現場応用(高橋)
- ③ 照射脆化予測と原子炉圧力容器の劣化管理
- ④ 機能の概念と機能モデルに基づく運転支援

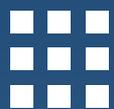
システムの機能異常(故障)を a.潜在的な事象(萌芽事象)と b.顕在化した事象(発現事象)の2階に分け、各事象の生起もしくは段階的な遷移に与える影響要因を一般化して記述する構造化手法。様々な故障モードを機械的・網羅的に表現、確認可能。これによりFMEA(故障モード影響解析)のような見落としを防ぎ、未知の故障モードの発見もできる。

高橋らの先行研究では、これまでに

萌芽事象:4カテゴリ、39種類

発現事象:24カテゴリ、60種類

事象生起・段階遷移の影響要因:5日カテゴリ、157種類
を集積し、広範なシステムに適用可能になってきている。



Ze共同研究の成果

ヘリオトロンJ(京都大学エネルギー理工学研究所)を対象とした実験研究をベースとした4つのサブテーマの次のテーマについては

- ① 電気機器劣化の高調波診断システムの現場機器への応用
- ② 故障生起汎化知識による故障メカニズムの構造表現と現場応用
- ③ 照射脆化予測と原子炉圧力容器の劣化管理(森下)
- ④ 機能の概念と機能モデルに基づく運転支援(五福)

③ 中性子照射脆化は緊急冷却時の熱衝撃事象発生時に圧力容器の閉じ込め機能喪失につながる。限られた実機照射材データを補間するマルチスケールシミュレーションの有効性について検討した。

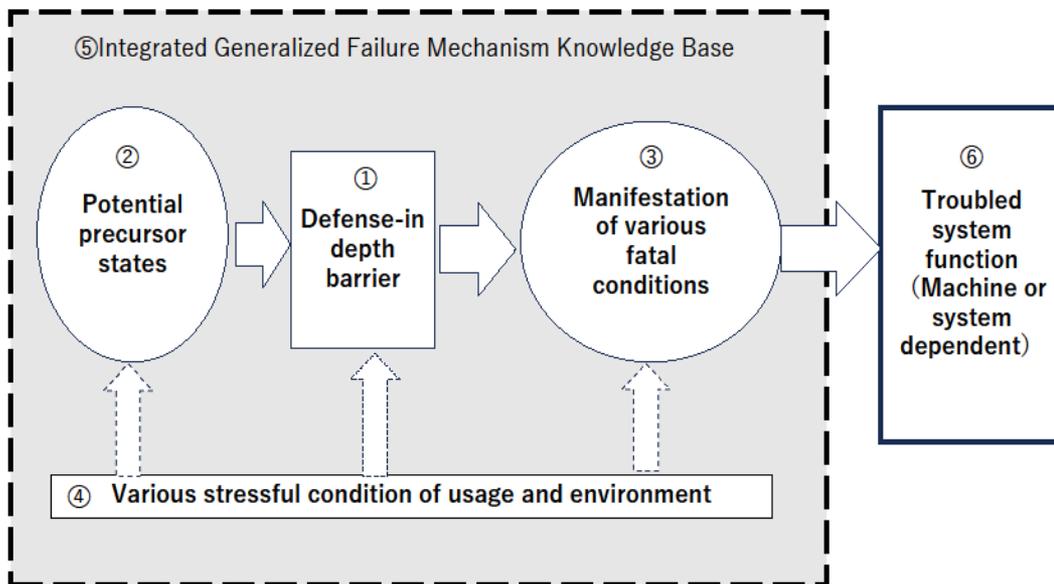
④ システムの機能を目標と手段の観点から図的に表現し、質量・エネルギー・行動・情報などの流れ構造として表現する機能モデル(Multilevel Flow Model)。原子力発電所の想定外異常事象発生時の対応操作手順の生成等への応用が可能である。

C. ストレスー失敗生起メカニズムー破壊モード

- ② 故障生起汎化知識による故障メカニズムの構造表現と現場応用(高橋)
- ③ 照射脆化予測と原子炉圧力容器の劣化管理(森下)

②と③をもとに、ストレスー失敗生起メカニズムー破壊モードの関係に関する構造化知識ベースとして、多重防護(DiD)コンセプトを取り入れた具体的な知識ベースの骨格を提起した。

多種多重な失敗モードを考慮するCの知識モデルの骨格



- ① DiDバリア機能喪失の閾値条件を中心に
- ②バリア喪失に至り得る状況
- ③バリア喪失後の致命的な状況
- ④使用・環境等のストレス条件を規定し、これらを一体化した
- ⑤故障生起汎化知識ベースを構築し、
- ⑥複雑システムの機能と対応付けることで、Cの知識ベースの骨格とする。

多重失敗モードの1例:

②中性子照射脆化+②緊急注水による熱衝撃 ⇒ ①バリアが壊れる ⇒ ③閉じ込め機能喪失 のような失敗モードの表現(知識ベース化)に適用できる



Ze共同研究の成果

ヘリオトロンJ(京都大学エネルギー理工学研究所)を対象とした実験研究をベースとした4つのサブテーマの次のテーマについては

- ① 電気機器劣化の高調波診断システムの現場機器への応用(新田、安倍、吉川)
- ② 故障生起汎化知識による故障メカニズムの構造表現と現場応用
- ③ 照射脆化予測と原子炉圧力容器の劣化管理
- ④ 機能の概念と機能モデルに基づく運転支援

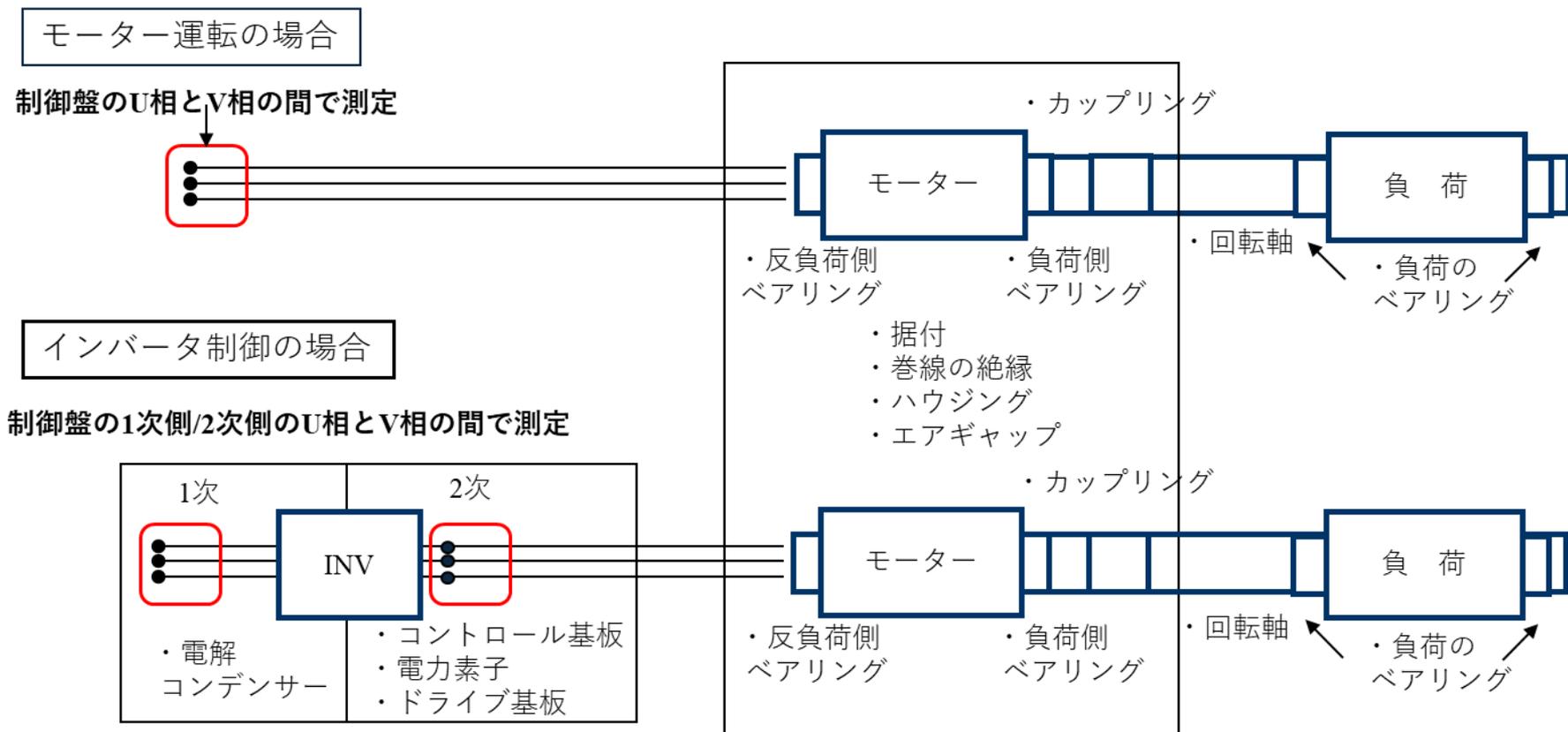
電気機器劣化の高調波診断システムとは:

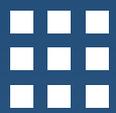
電源盤端子のサーチコイルで測定した電流波形の高調波成分から電気機器の故障部位とその劣化の程度を予測
運転状態の機器の非接触で連続モニタリングが可能な診断システム

以下のページから高調波診断の要点と実施結果を説明



高調波診断システムの測定位置と診断部位





高調波診断技術による機器劣化度推定の概要

- 高調波診断技術とは、電気設備を停止することなく、非接触・活線で電気設備の異常・劣化を診断する技術。
- 劣化度の推定に、多変量解析の中の主成分分析法を採用。
- 次ページに高調波主成分と診断対象部位との関連を図示。
- これまで3万7千200台の電気設備の高調波測定、その後の分解・検証をもとに、「寄与率表」(Fig.1)と「裕度表」(Fig.2)が作成。これが高調波診断技術開発のベースとなる。
- 4ページ後に診断アルゴリズムを略述。
- 京大宇治キャンパスエネルギー工学研究所へリオトロンJのNBI系の水冷却系を構成する電動ポンプを対象に実験。

高調波主成分と診断対象部位

高調波次数とモータ負荷側の相関図

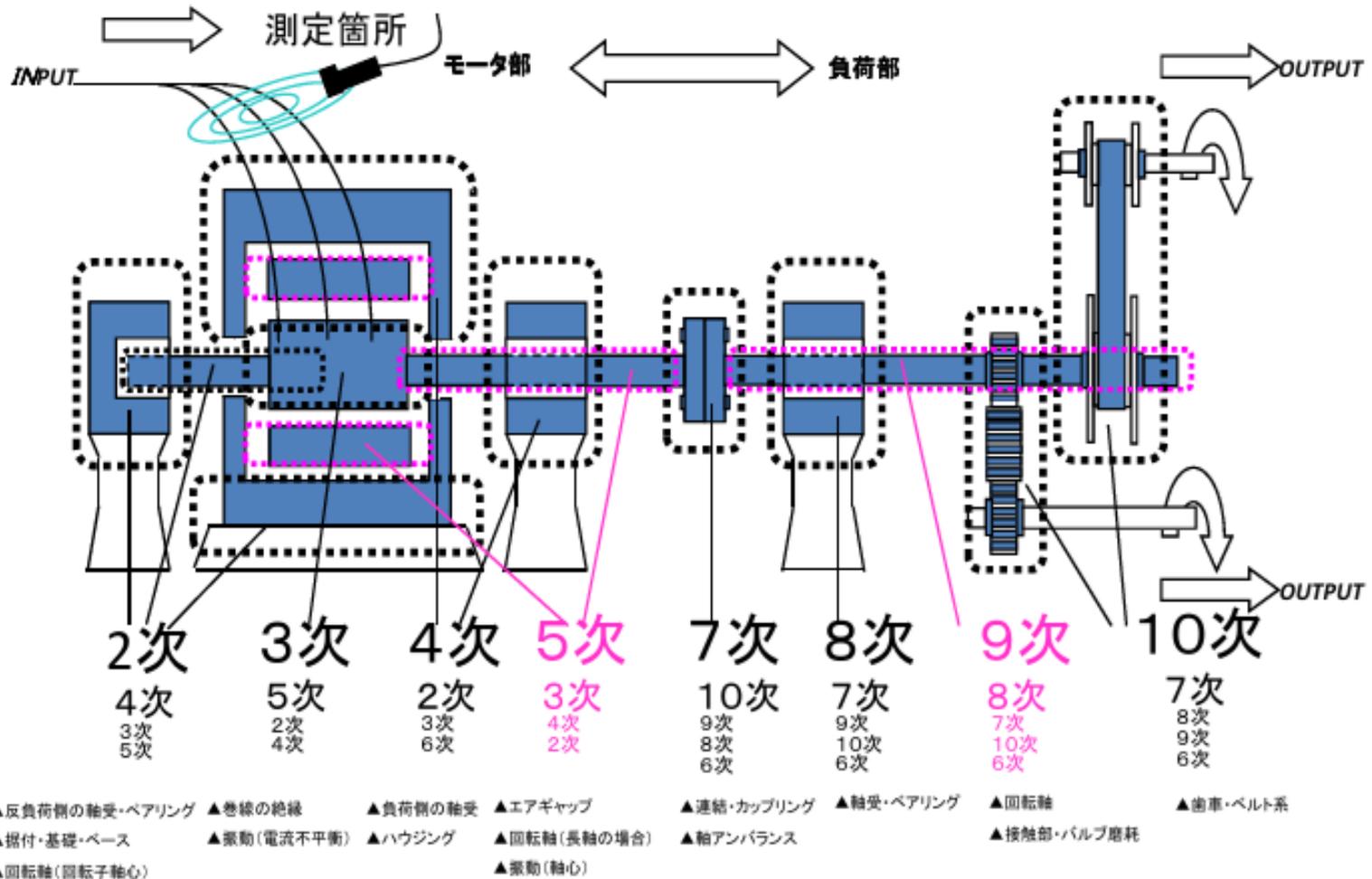


Fig.1 寄与率表

異常・劣化部位の高調波寄与率表

| | 劣化部位 | 第1次主成分 | 寄与する次数(得点順) | | | | | 累積寄与率 | |
|------|------------------|--------|-------------|-----|-----|----|--|-------|-----|
| | | 寄与率 | 寄与率 | | | | | | |
| モーター | 回転軸・軸受・扇付け | 2次 | 4次 | 3次 | 5次 | | | 86% | |
| | | 55% | 16% | 9% | 6% | | | | |
| | 固定子巻線の絡線 | 3次 | 5次 | 2次 | 4次 | | | 95% | |
| | | 61% | 22% | 7% | 5% | | | | |
| | 軸受・ハウジング損傷 | 4次 | 2次 | 3次 | 5次 | | | 82% | |
| | | 41% | 23% | 10% | 8% | | | | |
| | エアギャップ不均一 | 5次 | 3次 | 4次 | 2次 | | | 93% | |
| | | 59% | 20% | 8% | 6% | | | | |
| 負荷側 | カップリング異常・軸アンバランス | 7次 | 10次 | 9次 | 8次 | 6次 | | | 91% |
| | | 53% | 15% | 11% | 7% | 5% | | | |
| | 軸受損傷・異物付着 | 8次 | 7次 | 9次 | 10次 | 6次 | | | 95% |
| | | 35% | 29% | 13% | 11% | 7% | | | |
| | 回転軸異常・バルブ磨耗 | 9次 | 8次 | 7次 | 10次 | 6次 | | | 92% |
| | | 33% | 25% | 21% | 8% | 5% | | | |
| | 歯・ベルト系損傷 | 10次 | 7次 | 8次 | 9次 | 6次 | | | 91% |
| | | 30% | 23% | 17% | 15% | 6% | | | |

Fig.2 裕度表(管理数値の閾値)

■ モータ部

| (コロガリ軸受け) | | | | | |
|-----------|------------|-------------|--------|--------|--------|
| | 項目 | 初期異常(劣化レベル) | 注意レベル | 要注意レベル | 不良レベル |
| M1 | 回転軸・軸受・据付け | 0.35 ~ | 0.55 ~ | 0.65 ~ | 0.70 ~ |
| M2 | 巻線絶縁・振動 | 0.35 ~ | 0.55 ~ | 0.65 ~ | 0.70 ~ |
| M3 | 軸受・ハウジング損傷 | 0.25 ~ | 0.35 ~ | 0.45 ~ | 0.55 ~ |
| M4 | エアギャップ・振動 | 0.35 ~ | 0.55 ~ | 0.65 ~ | 0.70 ~ |
| (スベリ軸受け) | | | | | |
| | 項目 | 初期異常(劣化レベル) | 注意レベル | 要注意レベル | 不良レベル |
| M1 | 回転軸・軸受・据付け | 0.30 ~ | 0.50 ~ | 0.60 ~ | 0.65 ~ |
| M2 | 巻線絶縁・振動 | 0.35 ~ | 0.55 ~ | 0.65 ~ | 0.70 ~ |
| M3 | 軸受・ハウジング損傷 | 0.15 ~ | 0.25 ~ | 0.35 ~ | 0.45 ~ |
| M4 | エアギャップ・振動 | 0.35 ~ | 0.55 ~ | 0.65 ~ | 0.70 ~ |

高調波診断手法の要点

1. サーチコイルを用いて、電源電流の漏れ磁束を測定し高調波含有率を求める。(10KHzサンプリングで1024ポイントを7回測定し、信号強度の弱い下5回分の平均値をFFT処理し、電流に重畳される高調波を2次から40次まで計算する。)

2. Fig.1の寄与率表と上記で求めた高調波含有率から、診断に使用する「管理数値」を計算する。

各「管理数値」=各ストレス電圧

3. Fig.2の裕度表より計算された管理数値からどの部位がどの程度悪いかを判断する。

4. 負荷部に関しても、同様に計算しストレスや劣化を判断する。

管理数値の計算方法

①モータ側

- ・ 回転軸・軸受のストレス電圧：E (M1)
- ・ 巻線絶縁のストレス電圧：E (M2)
- ・ 軸受・ハウジングのストレス電圧：E (M3)
- ・ エアギャップのストレス電圧：E (M4)

$$\begin{bmatrix} E (M1) \\ E (M3) \end{bmatrix} = K_M \begin{bmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} E (M2) \\ E (M4) \end{bmatrix} = K_E \begin{bmatrix} i & j & k & l \\ m & n & o & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \end{bmatrix}$$

但し、 K_M ：機械定数
 K_E ：電気定数



E. 構造化された知識ベースの獲得と活用の フローチャート

E. 構造化された知識ベースの獲得と活用のフローチャートに関わる実施項目としてまず次の二つのテーマを実施した。

①高調波診断システムをヘリオトロンJの中性粒子ビーム入射装置(NBI)の水冷却系統(電動ポンプ)に適用。各ポンプの劣化部位とその機能の劣化程度を推定(新田)

②ポンプの各部、故障種類とその影響度、検知容易度およびポンプが動かなくなる危険度からその重要度を判断する知識を表形式として導出(吉川、新田、安倍)

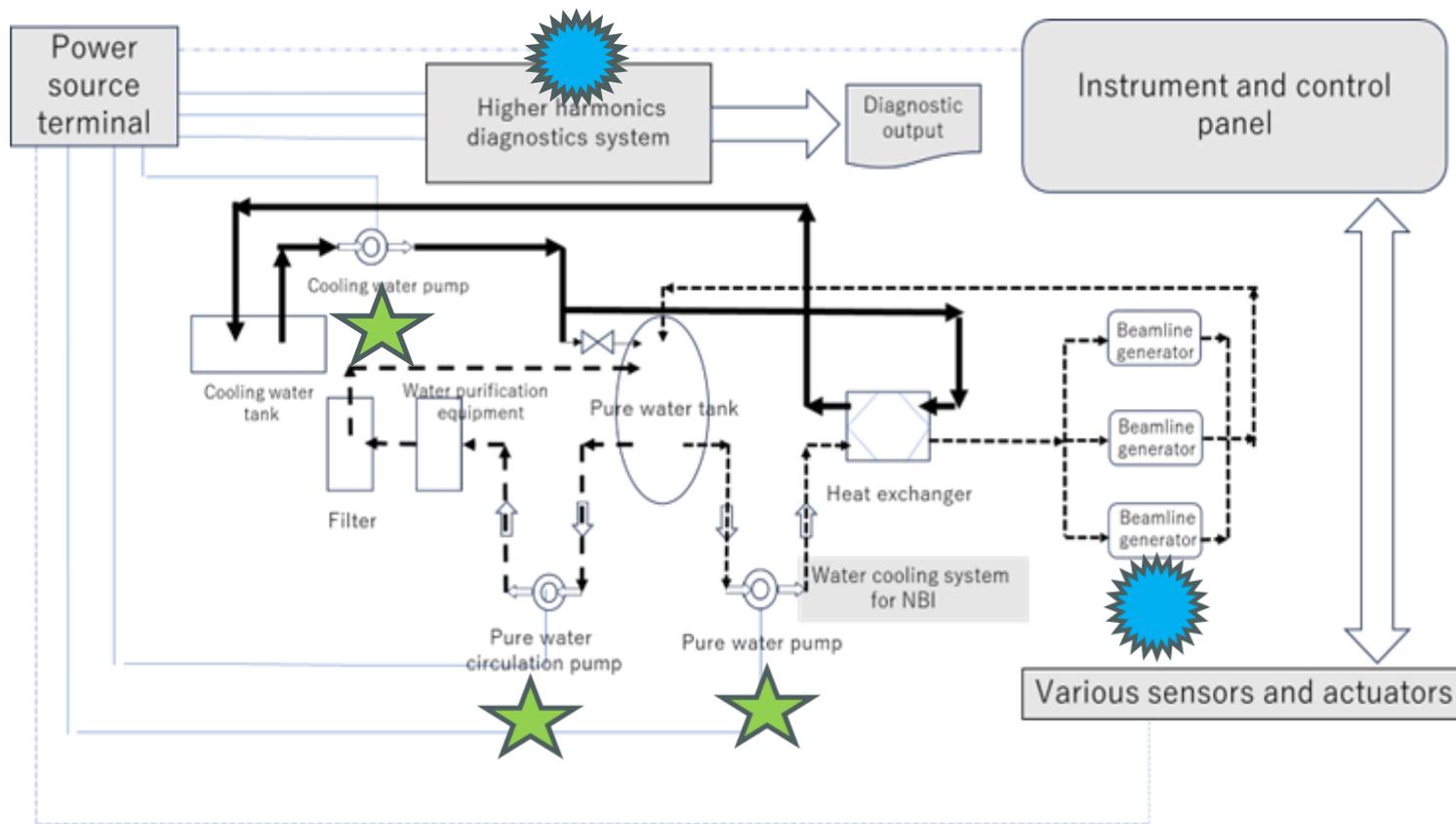
- * 影響度: その故障を見逃した場合にポンプが動かなくなる可能性を大中小で区別
- * 検知容易度: 高調波診断法以外での検知可能性を記入
- * 修復容易度: 修復できる可能性の有無とある場合のその仕方を記入
- * 重要度: 影響度、検知容易度、修復容易度を総合してポンプが動かなくなるのを防止する上でのその故障の重要度を大中小で記述

■ ■ ■ E. 構造化された知識ベースの獲得と活用のフローチャート
 ートラブルの予測と対策に関する知識ベース(A)ー

| 各部 | 電動機停止をもたらした故障部位 | 影響度 | 検知容易度 | 修復容易度 | 重要度 |
|-------|-----------------------------|-----|-------|----------------------|-----|
| モータ部 | 回転軸・軸受、据付 | 中 | 小 | 有り、容易、交換 | 中 |
| | 固定子巻線の絶縁 (相間 対地間 層間 振動) | 大 | 中 | 有り、困難、ワニス 処理、巻き直し | 大 |
| | 軸受・ハウジング損傷 | 中 | 小 | 有り、容易、交換 | 中 |
| | エアギャップ不均一 (塵埃付着 部分過熱 振動) | 大 | 中 | 有り、容易、吸引 による清掃 | 中 |
| 負荷部 | 回転軸アンバランス カップリング異常 | 小 | 小 | 有り、困難、芯だし 調整等 | 中 |
| | 軸受損傷 異物付着 | 小 | 小中 | 有り、容易、交換 | 中 |
| | 回転軸、接触部磨耗 | 小 | 小 | 有り、容易、交換 | 中 |
| | 歯車、ベルト系損傷 | 中 | 小 | 有り、容易、交換 | 中 |
| インバータ | 平滑(電解)コンデンサ | 中 | 大 | 有り、容易、交換 | 大 |
| | コントロール基板 | 中 | 大 | 有り、容易、基板交換 | 大 |
| | 電力素子 | 中 | 大 | 有り、容易、交換 | 大 |
| | ドライブ基板 | 中 | 大 | 有り、容易、基板交換 | 大 |

■ ■ ■ ■ E. 構造化された知識ベースの獲得と活用のフローチャート
 ■ ■ ■ ■ —活用のフローチャート—

③ヘリオトロンNBI水冷却系を、電源、電動ポンプ、ビーム発生・制御装置などの給電系回路図を中心にシステムの機能構成を下記の**ブロック図**で表現(吉川、松岡、安部)





E. 構造化された知識ベースの獲得と活用のフローチャート —活用のフローチャート—

④活用の一例として、**ブロック図**を基に、NBIへのビーム生成系の水冷却機能を果たす3つの電動モータの機能喪失の影響度を調査(吉川、新田)

ここでは3つのポンプの単一故障の場合、NBI電源の冷却が損なわれる影響の重大性から各々のポンプ故障の**重篤度**を3段階に分類した**総合診断表**

- 1 Cooling water pump の故障(動かなくなった)の影響
 - 1. 熱交換器の1次系の水が徐熱できない
 - 1. 1 NBIのビーム生成器の冷却水の温度が高くなる
 - 1. 1 その結果は？重篤度中
 - 1. 2 Cooling water の温度が上昇する
 - 1. 2 その結果は？重篤度小

- 2 Pure water circulation pump の故障(動かなくなった)の影響
 - 純水タンクの水の純度が落ちる
 - NBIのビーム生成器の冷却水の純度が落ちる
 - その結果は？重篤度中

- 3 Pure water pump の故障(動かなくなった)の影響
 - 3. 1 **NBIのビーム生成器に冷却水が供給されない**
 - 3. 1 その結果は？**重篤度大**
 - 3. 2 純水タンクの水の温度が上昇する
 - 3. 2 その結果は？重篤度中



以上で発表を終わります。
ご清聴ありがとうございました。