

# 詳細 FMEA データをもとにしたインターフェース情報の可視化

Visualization of design interface information based on detailed failure mode effect analysis data

○正 藤本圭一郎(JAXA)                      飯塚宣行(JAXA)                      正 大山 聖(JAXA)  
正 角有司(JAXA)                              正 藤井孝蔵(JAXA)                      正 南里秀明(JAXA)  
正 沖田耕一(JAXA)  
Akira OYAMA,                      JAXA,                      3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa  
Nobuyuki IIZUKA,                      JAXA,                      2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki  
Keiichiro FUJIMOTO, JAXA,                      3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa  
Yuuji KADO,                      JAXA,                      2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki  
Kozo FUJII,                      JAXA,                      3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa  
Hideaki NANRI,                      JAXA,                      2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki  
Koichi OKITA,                      JAXA,                      2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki

In order to improve an efficiency of failure analysis process by using failure mode and effect analysis (FMEA) and failure tree analysis (FTA), detailed FMEA/FTA support tool is developed. By using this tool, failure mechanisms can be analyzed with FMEA approach as well as FTA approach. In order to improve coverage of the extracted failure modes, new failure analysis approach is proposed, which is based on the interface N2 chart. Interface N2 chart is N2 chart which is extended to express the interface of mechanical system. Interface N2 chart can also be used to visualize the failure analysis result to describe system structure based on the knowledge obtained in failure analysis such as causal relationship of fault propagation. New schematic visualization method is discussed to realize useful visualization tool which promotes comprehensive understanding of failure mechanism.

*Key Words:* FMEA, FTA, Design interface, N2 chart

## 1. はじめに

現在、宇宙航空研究開発機構(JAXA)では人工衛星や宇宙輸送システムの開発から運用までの幅広いフェーズに対し、情報化技術を活用した開発・運用プロセスの改革を精力的に進めている。とくに H-IIA ロケットをはじめとした基幹ロケットにおいては、その国際競争力の増強を目指し、信頼性の更なる向上、低コスト化、および開発期間の短縮などの実現を目指した取り組みが進められている。2005 年度から我々のグループでは、とくに基幹ロケットの概念設計から詳細設計を含めた開発をターゲットとし、ロケットのバルブ部、ターボポンプ部の情報化活動をスタートし、その一環として、信頼性工学技術である Quality function deployment (QFD)や詳細 Failure mode effect analysis(FMEA)[1],および Failure tree analysis(FTA)の利用支援ツールの整備を進めてきた[2]。ロケットの高信頼性設計の実現のためには、システム成立性の検討に加えて、その各構成要素に対してどのような不具合が起こりうるかを正確に把握し、漏れない対策をとることが欠かせない。とくにロケットエンジンは、多数の構成部品が密接に連携して成立しており、複数の現象変化が複合的に起こることで故障にいたる不具合事象も考慮する必要がある。また、ロケット開発には多くの組織や設計者・技術者が関係するため、その間で交わされるべきインターフェース(以下 I/F)情報が十分でない設計上のトラブルが生じる。また、次期ロケットエンジンではエンジン出力の制御を行うことも検討中であるが、そのようなシステムを実現するためには、各作動条件下における不具合事象を正確に把握し、その対策内容を、部品だけではなく、部品間 I/F での設計仕様に確実に反映することが重要である。したがって、構成部品だけでなく部品間 I/F も含めて不具合事象を分析し、その対策を漏れなくとるとともに、その分析結果と対策内容を関連組織や関係者の間で技術蓄積として共有することが重要である。

我々が開発した FMEA/FTA 利用支援ツール[2]は、データ入力の手間の軽減、表記のゆれの防止、および過去データの流用など作業負担の軽減には大きく貢献するものの、見落としがちな配管のつなぎ目などの I/F についての不具合の整理と対策には対応していない。これは、ReliaSoft 社の XFMEA@など

の商用ソフトウェアや Hitachi の FMEA 支援ツール[3]についても同じである。そこで本研究では、I/F という概念をいかに FMEA や FTA に取り入れるか、不具合分析結果から I/F についての情報をいかに引き出し、不具合メカニズムの把握や不具合列挙の網羅性の向上につなげるかについての検討を行ったので、ここに報告する。まず、2 節では本研究の中で行った議論や現場からのヒアリング等で明らかになった不具合分析の実施時の問題点を提示し、3 節では、その対策のひとつとして開発した詳細 FMEA/FTA 利用支援ツールについて述べる。4 節では、本ツールの次の開発に向けて検討してきた、従来の不具合分析手法をベースに、I/F についての分析に適応可能な新しい不具合分析法や、I/F についての知見を、不具合分析結果から抽出する可視化法について述べる。

## 2. FMEA と FTA などの不具合分析実施における問題点

FMEA は、構成部品ごとに起こりうる全ての故障モードについて、その致命度などを評価し、対策内容を検討する信頼性設計手法である[1]。フォーマットは分野やメーカーによって異なるが、一般的に、その分析結果は Fig. 1 示すような表形式のシートとなる(以下 FMEA シート)。以下に、これまでの開発現場からのヒアリング等から明らかになった FMEA や FTA などの不具合分析をロケット開発で用いる際の課題点を示す。

### 2.1 部品点数の多さによる作業負担

ロケット全体の総部品点数は 28 万点にもおよび、バルブやポンプ部などのロケットエンジンのコンポーネントでも、ねじなどの部品を省くと部品点数は 100 点程度となる。したがって、コンポーネントに対してであっても、全ての部品について FMEA などの不具合分析を行うことは非現実的であり、JAXA では一般的に、数レベルの深さで部品構成を部品展開木として展開し、その機能ごとの不具合を抽出する機能 FMEA が用いられる。それでも、検討対象である部品-機能の組み合わせは数百ケースにもなるため、十分に詳細なレベルで分析できていないのが現状である。さらに、これまでの、一般的な表計算ソフトウェアを用いて分析を行っていたため、項目追加のたびに行や列を増やす

必要があるなど、本来、重要ではない部分に手間がかかることも大きな課題であった。

では、Fig.1やFig.2に示すようにその最小単位は一般的に部品の不具合/不具合モードであり、部品間 I/F についての分析には適していない。見落としがちで、人の頭の中の暗黙知になりがち

構成部品	設計要求事項	不具合モード	故障要因	不適合・改善事例	上位への影響 エンジンシステム	故障防止および検出のための対処 設計/開発	製造	発生可能性	影響度	検知 難易度	重要度
	機能										
部品A	機能A-1	不具合1	不具合2					7	5	1	35
			不具合10						7	5	1
部品B	機能B-1	不具合2	.....					7	5	1	35
	機能B-2	不具合3	.....					7	5	1	35
部品C	機能C-1	不具合10	.....					7	3	1	21
	機能C-2	不具合11	不具合33					7	3	1	21
	機能C-3	不具合29	.....					7	3	1	21

Figure 1. Example of detailed FMEA sheet.

### 2. 2 不具合の抜けの無い網羅の難しさ

前述のように、ロケットエンジンのコンポーネントであっても部品点数は非常に多く、その部品どうしが複雑に連動し、システムは成立している。結果として、考慮すべき不具合事象は複雑かつ多くなるため、その分析が難しいものの、信頼性の確保が欠かせないロケット開発においては、いかに致命的な不具合事象を抜けなく抽出し対策をとるかが重要である。

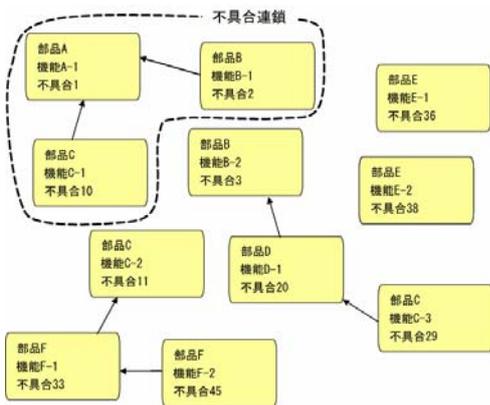


Figure 2. Example result of failure tree analysis.

### 2. 3 部品間の不具合連鎖、異常な状態変化の把握

ロケットエンジンは多くのコンポーネントが連動して成立しており、バルブやターボポンプなどの作動状態変化により、燃料の圧力や流量変化という形で相互に強く影響しあう。したがって、複数部品の状態変化が複合的に起こることで不具合につながるようなケースを考慮する必要がある。そのためには、各部品の不具合/不具合モードに加えて、不具合/不具合モードの連鎖を含めた分析方法である FTA の実施が欠かせない。Figure 2 に Fig.1 の例題に対応する FTA ネットワーク図を示す。いかに FMEA と FTA を上手く組み合わせると、効率的かつ漏れのない不具合分析を実現するかが課題である。

### 2. 4 インターフェース不具合の検討への対応

ロケットエンジンは多くのコンポーネントやモジュールから構成されており、そのコンポーネントも多くの部品から構成されている。更に、ロケットエンジンなどの大規模システムは、コンポーネントごとに担当する組織や技術者が異なるケースが多い。これらの部品の状態変化が、複合的に起こるような不具合を未然防止するためには、各部品の設計仕様などを見直すとともに、部品間 I/F の不具合の把握、I/F 仕様の見直しも加えて重要である。しかし、代表的な不具合分析法である FMEA や FTA におい

な I/F 不具合についても、可視化ツール等を活用した分析を行い、その結果を共通認識として関連組織や設計者・技術者に周知し、その対策をもれなく検討することが重要である。

### 3. 詳細 FMEA/FTA 利用支援ツール

前節 2.1, 2.2 および 2.3 の対策として、不具合分析作業の効率化、不具合列挙の網羅性の向上、不具合連鎖を含めた不具合分析の実現を目的に詳細 FMEA/FTA 利用支援ツールを開発した。ここで「詳細 FMEA」とは詳細設計段階で行う FMEA であり、部品、機能、不具合モード、および要因などの一般的な FMEA の項目に加えて、部品間の不具合連鎖も含めて不具合分析を行う。例として、Fig.2 に Fig.1 の例題に対応する FTA ネットワーク図を示すが、部品 A, B および C は不具合連鎖の関係にあり、それを FMEA シート形式で表現すると Fig.1 のようになる。Figure 3 に詳細 FMEA/FTA 利用支援ツールのユーザーインターフェースを示す。本ツールの主な構成要素は、(A)ツリー表示部、(B)FMEA 表の表示部、(C)FTA 編集/表示部であり、FMEA と FTA の両方のモードで編集および結果の表示ができるようになっている。簡単に部品展開や機能の入力が実施でき、表記のゆれを防止するための機能、過去のデータの流用機能などにより前項 2.1 の作業負担の大幅な軽減を実現している。また、バルブやポンプなどのコンポーネントに対する不具合分析データを自由に組み合わせると、上位システムであるロケットエンジンの不具合分析を実施するために必要な部品展開や機能データなどのインポート機能の充実したツールとなっている。

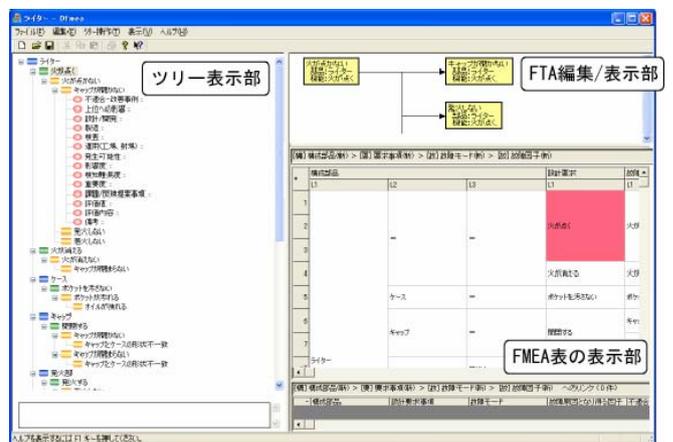


Figure 3. User interface of JAXA's detailed FMEA/FTA support tool.

#### 4. インターフェース情報の可視化

前項で述べたツールを用いて詳細 FMEA/FTA 分析を行うことで、Fig. 1 に示すような部品展開木の情報、各部品の機能リスト、部品-機能の組み合わせに対する不具合、Fig.2 に示すような各不具合、不具合モードどうしの連鎖関係(FTA ネットワーク上での因果関係)が結果として得られる。本節では、これに加えてインターフェースという概念をいかに FMEA や FTA に取り入れるか、不具合分析結果からインターフェースに関する情報をいかに引き出し、不具合事象の把握や不具合列挙の網羅性を向上させるかの具体案について議論する。

##### 4. 1. インターフェース表

I/F の表現方法には、主に、Fig.4 に示すようにネットワーク形式と N2 表形式が考えられる。N2 表とは主に衛星などの搭載ソフトウェアにおけるデータ・インターフェースの開発に用いられる表現方法[4]で、表の中の各セルは I/F を介したデータの入力と出力が表現される。Figure 4 に示した部品間の I/F の例では、左端の項目は I/F を介した状態変化の発生源である部品を示し、上端の項目はその状態変化を起こす部品を示している。I/F の存在するセルには、I/F の種類をあらわす名前を記入する。このようにして作成される表をインターフェース表と呼び、部品間の I/F の表現方法として用いる。この表現方法は、部品点数が多くなると非常に大きなマトリックスになるものの、I/F に関する全ての不具合事象を、漏れなく列挙する目的に適していると判断し、ここでは採用した。

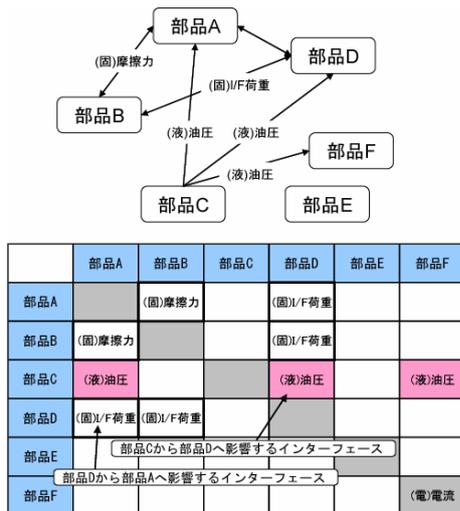


Figure 4. Description of interface as network and N2 chart.

##### 4. 2. インターフェース表を用いた不具合列挙の網羅性向上

FMEA/FTAを用いた分析における不具合の網羅性向上を目的に、インターフェース表を用いた不具合分析方法を提案する。従来の FMEA や FTA 分析は、各部品に注目し、部品ごとの不具合/不具合モードを列挙するアプローチであるが、ここでは、それに加えて、I/F に注目し不具合分析の列挙漏れをチェックすることで網羅性の向上を試みる。提案する不具合分析法の手順を Fig.5 に示す。はじめに、①従来法と同様に、部品展開木などで部品構成情報を作成する。次に、②インターフェース表の左端、上端部分に、部品展開木で作成した部品名を記入する。CAD などの部品構成情報や担当者間の議論をベースに、部品 I/F をリストアップし、表の該当部分に I/F の種類名を記入し表を完成させる。次に、③部品展開木の部品それぞれに機能を対応付けて、④各部品と機能との組合せに対し FMEA や FTA 分析を実施する。⑤得られた分析結果に含まれる不具合連鎖に関する I/F リストを抽出し、あらかじめ作成したインターフェース表と照らし合わせて、設計上の考慮対象として認識さ

れているため、インターフェース表中に含まれている I/F であるにも関わらず、不具合分析結果中には出てきていない I/F を抽出する。もし、そのような I/F があれば不具合の列挙漏れにあたると思われるため、それについての不具合/不具合モードを含めた不具合分析を再度実施する。この作業を繰り返すことで、設計上考慮すべき I/F についての不具合の漏れの少ない分析結果が得られ、不具合の網羅性向上につながると期待できる。

また逆に、不具合分析結果には含まれているのに、インターフェース表には存在しない I/F がある場合には、インターフェース表にその I/F を追加する。これにより、把握していなかった I/F を発見できるなど、インターフェース表の質の向上につながる。

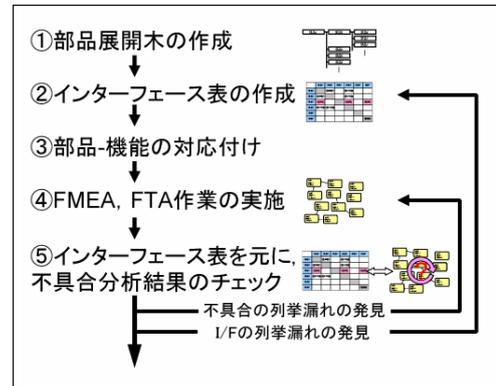


Figure 5. Interface N2 chart-based FMEA/FTA process.

##### 4. 3. インターフェース表を活用したシステム構造の可視化

ある状態変化や不具合要因が発生した場合に、どの部品にどのような不具合が起こり、どのように不具合が連鎖するかなど、不具合分析結果にはシステム構造を理解するための重要な情報が多く含まれている。本節では、システム構造を理解するのに役に立つインターフェース表を活用した I/F 情報の可視化方法について提案する。Figure 6 に Fig.1 および 2 の例に対応するインターフェース表を用いた分析結果の可視化例を示す。各部品名の下の数値は、その部品に関する不具合の件数を示している。また、Fig.6 の表中の 3 行 2 列目の“B→A”は、部品 B から部品 A への不具合伝播を示している。Figure 6 中の部品 C のように、ある部品の行方向に空白ではないセル数が多いものほど、多くの部品の不具合を誘発しネックとなっている部品である。また、部品 A は行方向には全て空白セルであるため、他部品の不具合を誘発しない部品であることがわかる。部品 E は、行方向と列方向のいずれにも該当項目が無いので、他の部品からの独立性の高い部品であることがわかる。また、部品 F は、他の部品からの影響も受けず、他の部品の不具合も誘発しないが、部品 F 内部での不具合連鎖が存在することがわかる。

このように、インターフェース表を用いて不具合分析結果を可視化することで、Fig.6 の例では、「部品 C がネックとなっている部品なので、その部品の設計変更を優先的に行おう」といった議論に役に立つことが期待できる。

##### 4. 4. FTA ネットワークの高度な可視化による不具合メカニズムの理解支援

一般的に製品の部品構成は階層構造を持ち、システムとしてのレベルの異なる部品が協調し、ひとつの機能を実現するケースも少なくない。したがって、その機能が失われるような不具合を含んだ不具合分析結果は、“システムレベルの異なる部品が混在し、多くの部品-機能の組み合わせについての不具合/不具合モードが相互に因果関係をもつ複雑なネットワーク構造”となる。一般的によく見られる FTA ネットワーク図の可視化方法は、Fig. 2 のような単純なネットワーク図であるが、1)どこに見たい部

品があるのかが分かりにくい、2)どの不具合連鎖が部品間の I/F を介したものであるのかが分かりにくい、3)どの部品とどの部品が構成要素と構成物の関係にあるのかが分かりにくいなどの欠点から、単純なネットワーク図を用いた可視化では、FTA ネットワークに含まれる全ての情報を表現することは難しい。

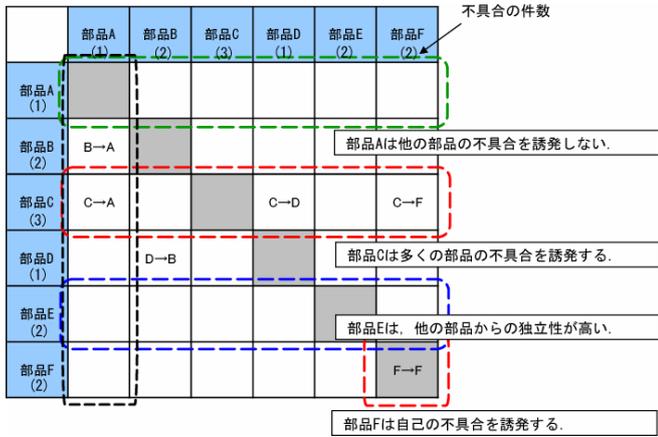


Figure 6. N2 chart view based on FMEA result.

そこで本研究で検討している FTA ネットワークの高度な可視化方法の一例を Fig.7 に示す。中心円が注目している最上位システムであるロケットエンジンを示しており、半径方向の広がりにはシステムレベルの変化(部品展開木では最小構成部品の方向への展開)を意味する。Figure 7 の例では中心円であるロケットエンジンの周囲を取り囲むように、ノズル、燃焼器、ターボポンプなどのコンポーネントが表現され、さらにその外周の部品 A～I は各コンポーネントの構成部品を示している。例えば、部品 E と F はターボポンプの構成部品に該当する。

これらの各部品や機構を表現している領域の中に、Fig.2 の FTA ネットワーク図で不具合/不具合モードを示すノードを配置することで、どの不具合連鎖が部品 I/F に関するものであるか、また、それはどの部品間の I/F であるかなどを直感的にわかりやすく表現できる。更に、どの部品がどの機構の構成要素であるかも明示的に表現できるため、部品の構成情報を含めて、全体を理解しやすいなどの利点を持っている。例えば、Fig.2 と Fig.7 は同じ不具合事象を表現したものであるが、Fig.2 のネットワーク図では、部品 E と F はターボポンプの構成部品であるかどうか不明であるのに対し、Fig.7 ではそれが明示的に示されている。

また、Fig.7 の右図は、部品レベルの異なるものの中で、下位レベルのどの部品のどの不具合が集まって、上位システムの立

場から整理した不具合に該当するのかが表現している例である。ロケットエンジンなどのシステム設計と、ポンプなどのコンポーネント設計など、設計対象によって不具合分析の粒度が異なるため、このような可視化手法でシステムとしての部品レベルの異なるものどうしの不具合の相互関係を把握することは重要である。

このような可視化技術を活用し、不具合分析結果から得られる知見を最大限に引き出すことで、複雑なシステムの理解を手助けするとともに、人間の新たな気づきを促す効果を得られることが期待できる。

## 5. まとめ

ロケットの高信頼性化設計の確立を目指し、FMEA および FTA を用いた不具合分析を対象に、作業負担の軽減、不具合列挙の網羅性向上、従来の不具合分析手法の部品間のインターフェースへの拡張を行った。複数の部品間のインターフェースを介した複合的な不具合事象を取り扱える FMEA/FTA 利用支援ツールを開発した。本ツールにより不具合分析作業の大幅な効率化を実現した。さらに、部品間インターフェースの表現に N2 表を適用したインターフェース表を提案し、それを活用した新たな不具合分析手法を提案した。これにより、不具合の網羅性向上だけでなく、把握していなかったインターフェースに気がつくといった効果が期待される。さらに、インターフェース表を活用した不具合事象のメカニズムの観点からシステム構造を理解する手法を提案した。また、FTA ネットワーク図に含まれる情報の理解を支援するネットワーク図の可視化方法を提案した。

今後は提案したこれらの内容を、更に現場の設計者・技術者等と議論しツール化を行い、ロケット開発の業務プロセスの改革に取り組む予定である。

## 謝辞

詳細 FMEA/FTA 利用支援ツール等の開発にあたり、プログラミング等でご協力いただいている(株)富士通長野システムエンジニアリングの皆様に謝辞を表す。

## 参考文献

- [1]小野寺 勝重, グローバルスタンダード時代における実践 FMEA 手法, 日科技連出版社(1998), ISBN 4-81-7130415.
- [2]大山 聖, 藤本 圭一郎, 飯塚宣行ら, JAXA 基幹ロケットバルブの信頼性向上へ向けた開発の情報化, 第 17 回設計工学・システム部門講演会, 講演論文集(未発行).
- [3]湯田 晋也, 製品機能展開に基づく FMEA 支援ツール, 第 16 回設計工学・システム部門講演会, 講演論文集 p.210-213.
- [4]NASA System Engineering Handbook, NASA SP-610S, June 1995.

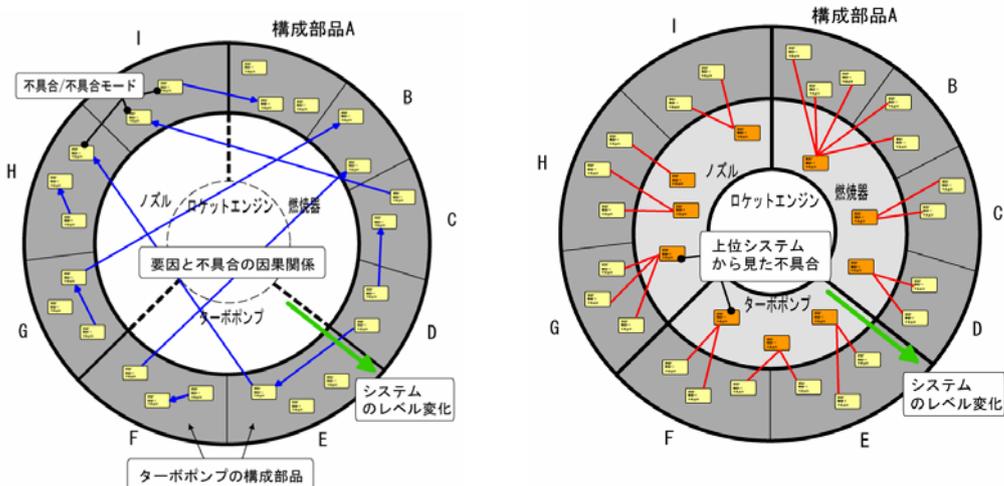


Figure 7. N2 chart view based on FMEA result.