

JNC TJ9400 2003-010

低除染燃料製造システム
特性評価手法に関する調査(2)
(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2003年2月

三菱マテリアル株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

2003年2月

低除染燃料製造システム特性評価手法に関する調査(2)

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

半沢 正利*、吉村 忠宏*、宗片 英樹*
田巻 喜久*、大山 有代*

要 旨

本検討では、FBR サイクル実用化戦略調査研究のフェーズⅡの2年度として、低除染ペレット法に対する機器の運転特性、機器交換頻度を考慮した稼働率を検討するとともに、機器交換による廃棄物発生量を算出できるようにシミュレータの改良を行った。また、他の燃料製造システムに適用することで、製造システム間の稼働率の比較検討を行い、下記の成果を得た。

- (1) 機器の運転特性による機器稼働率の計算方針を整理するとともに、稼働率を向上できるバッファ容量、機器処理能力、台数に関する最適化を行った。
- (2) 部品を定期交換するケースと故障時に部品を交換するケースに対応できる廃棄物発生量算出プログラムを作成した。
- (3) 他の燃料製造システムへの適用を行い、製造システム間の特性比較の考え方を整理し、稼働率の比較検討を行った。
- (4) 昨年度作成した特性評価シミュレータのデータ入力方法について、より簡便な方法を検討し、シミュレータに組み込んだ。

本報告書は、三菱マテリアル株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当部課室：大洗工学センター システム技術開発部 燃料製造システムグループ

*：三菱マテリアル株式会社

February 2003

The study of characteristic evaluation techniques about nuclear fuel pellet
manufacturing systems (2)

Masatoshi Hanzawa*, Tadahiro Yoshimura*,
Hideki Munekata*, Yoshihisa Tamaki*
Tomoyo Ohyama*

Abstract

In this study, while examining the operating ratio which took into consideration the operation characteristics of apparatus for the low decontamination pelletizing method, and apparatus exchange frequency as the 2nd fiscal year of phase II of FBR cycle utilization strategy investigation research, the system characteristics evaluation simulator was modified to able to calculate waste amount generated by fixed exchange of the parts. A comparison study of the operating ratio in a few other fabrication system was also performed by applying the simulator to them, and the following result was obtained.

- (1) While arranging the setting plan of operation characteristics of apparatus in connection with the apparatus operating ratio, optimization of the buffer capacity, throughput, and the number which improve operating ratio was performed.
- (2) The calculation program of waste amount generated which can respond to the case of fixed exchange of the parts, and the case parts of exchange at the time of failure was made.
- (3) The comparison method of the system characteristics among fabrication systems was considered, and comparison examination of operating ratio was performed by applying to the other fuel fabrication systems.
- (4) The simpler method for data input of the characteristic evaluation simulator manufactured in the last fiscal year was examined, and the simulator modification was carried out.

Work performed by Mitsubishi Materials Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC liaison : Fuel Fabrication System Group, System Engineering Technology
Division, O-arai Engineering Center

* : Mitsubishi Materials Corporation

目 次

1.はじめに.....	1
2.稼働率向上方策の検討.....	2
2.1 機器の運転特性と稼働率.....	2
(1) 機器の運転特性と稼働率に関する基本的考え方.....	2
(2) 低除染燃料製造システムへの適用.....	2
2.2 バッファ容量、機器処理能力、台数と稼働率.....	3
3.定期交換を考慮した稼働率算出プログラムの検討.....	5
3.1 基本的考え方.....	5
(1) 故障率の型と定期交換の相関.....	5
(2) 産業界の故障発生状況.....	5
(3) 故障率の型と MTBF (MTTF).....	6
3.2 定期交換を行う場合の MTBF (MTTF)	7
3.3 故障率の型の設定.....	8
4.廃棄物発生量プログラムの検討（定期交換と廃棄物発生量の相関）.....	12
5.定期交換を考慮した稼働率と廃棄物発生量の計算結果.....	14
5.1 定期交換と $MTBF_T$ (or $MTTF_T$) の関係	14
5.2 定期交換と稼働率および廃棄物発生量の関係.....	15
5.3 プラント全体の定期交換と稼働率および廃棄物量の関係.....	17
6.燃料製造システムの特性比較.....	29
6.1 システム稼働率の計算.....	29
6.2 システム稼働率の比較.....	38
6.3 システム特性比較上の課題.....	38
(1) 入力データの取得・設定状況.....	42
(2) 入力データの取得・設定状況.....	42
(3) 入力データの基準.....	42
7.特性評価手法の改良.....	45
8.まとめ.....	46
9.参考文献.....	47

図 目 次

図 5.1-1 標準偏差と正規分布および定期交換補正後 MTBF _T	18
図 5.1-2 標準偏差と正規分布および定期交換補正後 MTBF _T	19
図 5.2-1a 標準偏差 : $\sigma = 50$ 、定期交換廃棄物量（全交換）	20
図 5.2-1b 標準偏差 : $\sigma = 100$ 、定期交換廃棄物量（全交換）	21
図 5.2-1c 標準偏差 : $\sigma = 200$ 、定期交換廃棄物量（全交換）	22
図 5.2-1d 標準偏差 : $\sigma = 300$ 、定期交換廃棄物量（全交換）	23
図 6.1-1 湿式ゲル化振動充填フロー.....	30
図 6.1-2 乾式振動充填フロー.....	31
図 6.1-3 湿式ゲル化シミュレータフロー.....	32
図 6.1-4 湿式ゲル化階層フロー（顆粒製造）	33
図 6.1-5 乾式振動充填シミュレータフロー.....	34

表 目 次

表 5.3-1 プラント全体の定期交換と稼働率および廃棄物量の関係.....	24-27
表 5.3-2 低除染ペレット製造プラント稼働率.....	28
表 6.1-1 湿式ゲル化振動充填機器単体稼働率.....	36
表 6.1-2 乾式振動充填機器単体稼働率.....	37
表 6.1-3 各燃料製造システムの稼働率の比較.....	38
表 6.3-1 システム設計条件の比較（内側炉心燃料製造）	39
表 6.3-2 稼働率計算用入力データの取得・設定状況の比較.....	40
表 6.3-3 稼働率計算用入力データの基準比較.....	41
表 6.3-4 工程稼働率の試算結果の比較（燃料要素組立または振動充填の例） ..	43

参考資料

1. はじめに

現在検討している燃料製造システムは低除染 MA 含有燃料を対象としており、セル内の遠隔製造が必要である。セル内製造とした場合の燃料製造プラントの稼動率はシステム安定性の指標となり、経済性および廃棄物発生量にも影響があるため、評価が重要である。そのため、2000 年度よりプラント特性評価手法の開発を行っており、フェーズⅡの初年度である昨年度は、プラントの稼働率およびバッファ効果を計算する手法を検討し、プラント稼働率向上のための方策とその効果について評価できることを確認した。今年度は、低除染湿式ペレット法に対する機器の運転特性、機器交換頻度を考慮した稼働率を検討するとともに、定期交換を考慮した廃棄物発生量について検討を行う。また、他の燃料製造システムへの適用を行い、システム間の特性比較の例としてシステム安定性としての稼働率の比較検討を行う。

2. 稼働率向上方策の検討

2.1 機器の運転特性と稼働率

(1) 機器の運転特性と稼働率に関する基本的考え方

機器・部品等の平均故障間隔 MTBF(平均寿命 MTTF)や平均修理時間(MTTR)はカタログ値や実績から概略決定しているが、作動回数や稼動時間により MTBF が変化する可能性が考えられる。

作動回数や稼動時間を考慮にいれた運転時間について、電力中央研究所の成果「ガスタービン保守最適化支援プログラムの開発」⁽¹⁾において等価運転時間として紹介されている。

$$\text{等価運転時間} = \text{実運転時間} + k_1 \times (\text{起動回数} + k_2 \times \text{トリップ回数}) \\ + k_3 \times \text{ピーク運転時間} \quad (2.1)$$

本式は等価運転時間を表す一例であるが、実運転時間に起動回数等の負荷ファクタを考慮して、それを等価運転時間として再構築していることが分かる。

この考え方方に従うと、カタログ値や実績から概略決定した MTBF を等価運転時間とし、それまでの起動回数、トリップ回数、ピーク運転時間などの機器の運転特性を本式に入力して実運転時間として算出し、得られた実運転時間を新たに作動回数や稼動時間を考慮にいれた補正後の MTBF として、稼働率の計算（計算式 = $(\text{MTBF}/(\text{MTBF}+\text{MTTR}))$ ）に用いるという方法となる。

本考え方自体は特殊なものではないと考えられるが、 k_1 等の係数を事前に知っておく必要があり、また、これら係数は機器・部品ごとに異なるため、相当量のサンプルデータに基づくデータベースが要求される。寿命に関するサンプルデータは、例えばベアリング、歯車、スライドブッシュ、スライドシフタ、LM ガイド、ボールスプейン、ギヤモートル、ウォーム減速機、無段変速機、モータ等の各社カタログから得られる。

(2) 低除染燃料製造システムへの適用

上記の考え方方に従うと、機器の寿命に影響を及ぼす可能性のある運転特性を抽出して、プラント特性シミュレータに組み込む必要がある。

低除染燃料製造プラントにおいて、機器の寿命に影響を及ぼすと考えられる主要な運転特性を以下に示す。

- ① 機器の作動回数
- ② ピーク運転時間
- ③ 放射線
- ④ 周囲の雰囲気（硝酸などの腐食性雰囲気）
- ⑤ 運転温度
- ⑥ 運転負荷

そこで、これらの因子を上記の電力中央研究所研究成果に示されているような相関式に

当てはめてみると、概略、次式のようになると考えられる。

$$\text{運転特性補正後 MTBF} = \{C - (Q \times R) - (S \times T - S)\} \times U \times V \times W \times X \quad (2.2)$$

ここで、各記号は次のとおりである。

C ; 標準 MTBF (カタログ値など)

Q ; 作動回数 (起動回数)

R ; 作動回数補正係数

S ; ピーク運転時間

T ; ピーク運転時間補正係数

U ; 放射線補正係数

V ; 雾氷気補正係数

W ; 温度補正係数

X ; 負荷補正係数

(2.2)式により得られる運転特性補正後 MTBF は標準 MTBF より短くなるため、運転特性補正後の稼働率は標準 MTBF を用いた場合より小さくなり、従って、プラントの稼働率を評価する場合、シミュレーション結果は安全側の値が得られる。

2.2 バッファ容量、機器処理能力と稼働率

低除染ペレット燃料製造プラントについて、本年度に並行して進めている検討「低除染ペレット燃料製造ライン構成の調査」(三菱マテリアル株式会社)⁽²⁾の5章において、本シミュレータを用いバッファ容量、機器処理能力をパラメータに稼働率に対する感度解析を行った。この結果、稼働率の向上方策として以下に述べるバッファ容量、機器処理能力の設定方針が得られた。

- ① バッファは、ペレット単位での処理に伴い発生する搬送不良停止により、稼働率が低くなると考えられる工程の前段に設置する。また、多数のバッファ設置が好ましい工程がある場合、設置効果は上流側に設置するほど高くなる。低除染ペレット燃料製造システムの場合、ペレット成形、焼結、研削およびペレット検査の前段に設置する。また、合格ペレット、燃料要素、製品燃料集合体については、貯蔵庫を設ける。
- ② バッファ容量が大きいほど稼働率は高くなるが、主工程セル内にスペースを必要とするため極力小さくするのが望ましい。低除染ペレットシステムの場合、機器処理能力、台数とも関連するが、合理的な最大処理能力（通常時の1.2倍）、台数を設定した場合6日分程度の容量があると、システム全体の稼働率の低下を防ぐことができる。
- ③ バッファを設けて稼働率向上の効果を得るために、各工程機器のトラブル時に前段のバッファにたまつた燃料を、機器の回復時に速やかに吐き出す必要があるので、機

器処理能力は、通常運転時の処理能力よりも大きくしなくてはいけない。処理能力増強の方策としては、機器単機の処理能力を大きくする方法と機器台数を増やす方法が考えられるが、経済的に前者が優先され、機器特性上単機の能力を大きくできない場合に、後者の方がとられるものと考えられる。低除染ペレットシステムの場合、通常運転時の1.2倍程度が適切と考えられるが、②で述べたバッファ容量を十分確保できないときには、より大きい処理能力が要求される。稼働率の解析結果からは、機器台数を増やす必要は認められなかった。

- ④ 低除染ペレット燃料製造システムの場合、適切なバッファと機器処理能力の設定により、上限である脱硝転換工程の稼働率(80.31%)に近い79~80%の稼働率が得られる。

3. 定期交換を考慮した稼働率算出プログラムの検討

3.1 基本的考え方

定期交換による稼働率の影響・評価では、定期交換は予防保全の観点で実施するため稼働率は向上するというのが一般的な考え方と思われがちであるが（その分、保守作業は増加し、廃棄物も増える）、初期故障率が高い機器は定期交換をするたびに故障率が高い値にリセットされるため定期交換が無意味であるなど、運転経過時間に対する故障率の関係が定期交換に対して有効でなければ、定期交換と稼働率について正の相関は得られない。

以下に定期交換を行う場合の稼働率設定の考え方について述べる。

(1) 故障率の型と定期交換の相関

故障率の型には、故障率が時間とともに減少する減少型、時間に依存しない一定型、増加する増加型さらにそれらの組み合わせであるバスタブ曲線などがあるが、このうち、初期故障率が大きい減少型およびバスタブ曲線（バスタブ曲線は前半が故障率減少型となっている）は上述のとおり定期交換をするたびに故障率が高い値にリセットされるため、定期交換は行わないというのが一般的な考え方である。また、故障がランダムに発生する故障率一定型も定期交換は無意味であると考えられる。

定期交換が有効になるのは、時間が経過し、磨耗、老化等で本質的に寿命がきて、集中的に故障が起こる前に予防保全で取り替える場合で、故障率の増加型や故障率一定型であって後半が増加型になるようなケースがこれに相当する。

(2) 産業界の故障発生状況

産業界の故障発生状況に関する最近の報告例として、2002年3月の第15回エネルギー政策検討会での原子力政策の高経年化対策に関する東京大学名誉教授の朝田泰英氏の講演⁽³⁾がある。

この中で、ユナイテッド航空の故障発生率の事例が示されており、故障率がいわゆるバスタブ曲線となる故障パターンについては全体に対する割合が4%で、かつ、ネジなどの単純な部品がバスタブ曲線となり、他のほとんど大部分が、当初期間の故障率の低い・高いの違いはあるものの、故障発生率が安定するという結果が得られていると報告されている。

また、原子力発電所に関する我が国の報告書でも、故障率は年数によらずほぼ一定という結果があることも本公演で述べられている。

このような故障率データとなる理由として、朝田氏ははっきりとしたことはわからないがという前提で、たくさんの部品を寄せ集めた複雑な機器では、個々の部品は寿命があるが、それらの寿命はまちまちであるため、全体として同じ確率で故障がおこる、あるいは、飛行機の分野では、飛行時間ごとに検査あるいは交換をするので、故障が出そ

うなものが無くなつていき、故障曲線が平らになるのではないかと述べている。

すなわち、産業界において装置や機器は、それを構成する部品に対して時間が経過し、磨耗、老化等で本質的に寿命が来る故障率增加型であり、定期交換が有効と考えられる。

(3) 故障率の型と MTBF(MTTF)

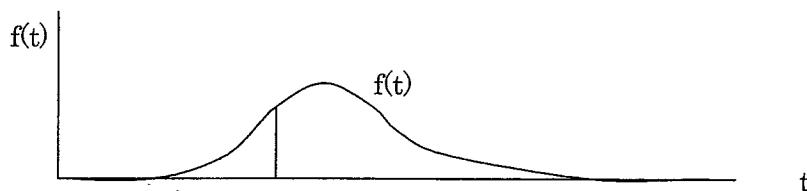
稼働率シミュレータでの入力データは、稼働率の定義より機器の MTBF(MTTF)と MTTR としているが、このうち MTTR について故障時、定期交換時の MTTR は同じ時間がかかるとすると、定期交換による稼働率向上は、MTBF が定期交換を行わない場合に比べ長くなるということにより表されることになる。

上記(1)、(2)より、装置や機器は定期交換が有効な故障率增加型の部品により構成されることが分かったが、ここでは、まず、明らかに定期交換の概念が当てはまらない故障率減少型を除いた、故障率一定型、増加型の MTBF(MTTF)について、数学的な検討を行うこととする。

a. 故障率一定型の MTBF(MTTF)

まず、一般的な平均寿命すなわち平均故障間隔 MTBF(MTTF)の基本的考え方について表すと以下のようになる。すなわち、下図のように横軸に時間を縦軸に故障密度（その時間における故障発生確率）をとると、MTBF(MTTF)は、時間 t にその t における故障密度 $f(t)$ を乗じたものを時間 0 から ∞ まで積分することで定義されることがわかる。

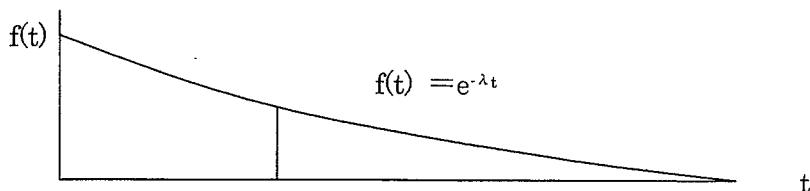
$$MTBF(MTTF) = \int_0^\infty t f(t) dt \quad (3.1) \text{ [定義式]}$$



故障率一定の場合には、故障密度は指数関数となることから（下図）、上記式に故障率 λ が一定の場合の故障密度関数 $f(t) = e^{-\lambda t}$ を代入して解くと、

$$MTBF(MTTF) = 1 / \lambda \quad (3.2)$$

となる。



このように、故障率が一定の場合は、MTBF(MTTF)は故障率の逆数で、MTBF(MTTF)

$=1/\lambda$ となる。

b. 故障率増加型の MTTF

故障率増加型では、故障密度関数は正規分布になるか、ワイブル分布のうち形状パラメータ(m)が > 1 の場合の分布となる。

ワイブル分布の形状パラメータ(m)が > 1 の場合、MTTF はガンマ関数（下記式の積分部分）という関数を用いた式で表される。故障率が時間とともに増加するため、定期交換が有効であるが、ガンマ関数自体が時間を含む関数を 0 時間から ∞ まで積分するかたちとなっており、MTTF の基本的な成り立ちは(3.1)式と同様であることがわかる。

なお、故障率が増加するケースのため寿命が尽きるという観点から、平均故障間隔(MTBF)ではなく平均寿命(MTTF)とする。

$$\text{MTTF} = t_0^{1/m} \int_0^{\infty} t^{1/m} e^{-t} dt \quad (3.3)$$

なお、(3.3)式で $m=1$ のとき、 $\text{MTTF} = t_0 = 1/\lambda$ となり、上記(1)の故障率が一定の場合と同一となる。

3.2 定期交換を行う場合の MTBF(MTTF) (4)、(5)、(6)

運転開始後、ある時間 T ごとに定期交換を行う場合の MTBF(MTTF)は以下のようになる。

MTBF(MTTF)は(3.1)の定義式にあるように、ある時間での故障した割合にその時間を掛け算して、それを時間 0 ~ ∞ まで積算したものであるので、同様に、定期交換を行う場合も時間 T における寿命の合計を算出することになる。ただし、時間 T までにすべて故障したわけではないので、時間 T までの積算故障率（不信頼度 F(T)；1 - 信頼度 R(T)）での補正が必要で、時間 T における寿命の合計を不信頼度 F(T)で割り算する。（なお、詳細な数学的アプローチを<参考>に示す。）

具体的には、時間 T ごとに定期交換を行う場合の MTBF(MTTF)を $\text{MTBF}_T(\text{MTTF}_T)$ とすると、 $\text{MTBF}_T(\text{MTTF}_T)$ は、時間 T における寿命の合計 ($\int_0^T t f(t) dt + T * R(T)$) を F(T) あるいは $(1 - R(T))$ で割り算することにより求まる。

$$\text{MTBF}_T(\text{MTTF}_T) = (\int_0^T t f(t) dt + T * R(T)) / F(T) \quad (3.4)$$

例として、故障率一定型の場合で、時間 T が MTBF(MTTF)に達した時点で定期交換するケースの $\text{MTBF}_T(\text{MTTF}_T)$ を計算すると以下のようになる。

故障率一定型では、 $f(t) = e^{-\lambda t}$ であり、時間が MTBF(MTTF)のとき、 $R(T) = 0.37$ ($F(T) = 1 - R(T) = 0.63$) のため、上式は、

$$\begin{aligned} \text{MTBF}_T(\text{MTTF}_T) &= (\int_0^{\text{MTTF}} t e^{-\lambda t} dt + \text{MTTF} * 0.37) / 0.63 \\ &= ([-t e^{-\lambda t} - e^{-\lambda t}]_0^{\text{MTTF}} + \text{MTTF} * 0.37) / 0.63 \\ &= \text{MTBF}(\text{MTTF}) \end{aligned} \quad (3.5)$$

（本計算では、故障率一定型のため、MTBF(MTTF)として $1/\lambda$ を入力した）

と等しくなり、故障率一定型では定期交換は意味をなさないことがわかる。

さて、定期交換時の稼働率は、修復時間 MTTR を設定すれば以下の式により求まるが、ここで、MTBF_T(or MTTF_T)は(3.4)式より算出した値を用いる。ただし、(3.6)式では、定期交換に伴う交換時間は、修復時間 MTTR に比べて十分に短いとする。

$$\text{定期交換時の稼働率} = \text{MTBF}_T(\text{or MTTF}_T) / (\text{MTBF}_T(\text{or MTTF}_T) + \text{MTTR}) \quad (3.6)$$

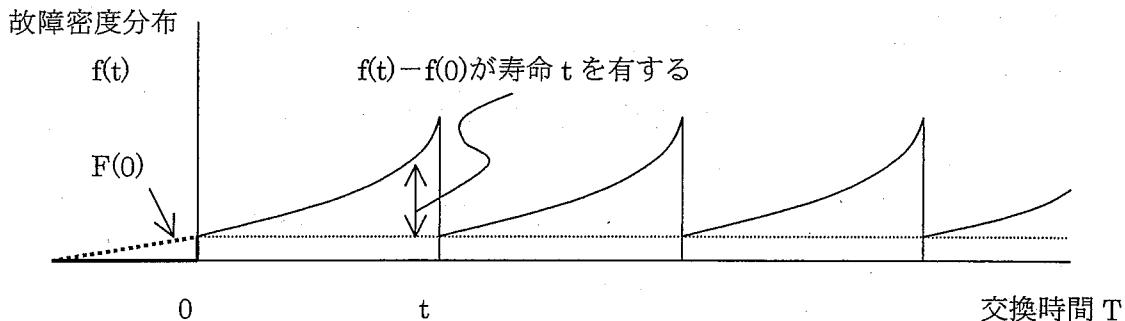
ただし、新規交換時に既に故障している可能性のあるような場合（例えば、故障密度分布が正規分布で標準偏差が大きい場合は、新品時に既に、ある確率 F(0)で故障している）は、(3.4)式は次式のようになる。

$$\text{MTBF}_T(\text{or MTTF}_T) = (\int_0^T t(f(t) - f(0))dt + T * R(T) + 0 * F(0)) / F(T) \quad (3.7)$$

ここで、下図に示すとおり、(3.7)式右辺の $\int_0^T t(f(t) - f(0))dt$ は、f(t)に関して新品故障確率 f(0)分を補正しており、0*F(0)は新品時に故障している機器についてその寿命 (=0) を考慮したものである。

なお、新品の故障確率 F(0)は次式で表される。

$$F(0) = \int_{-\infty}^0 f(t)dt \quad (3.8)$$



3.3 故障率の型の設定

定期交換が稼働率向上に効果的であるという情報を稼働率シミュレータに組み込むためには、機器・部材等に設定された MTBF(MTTF)よりも寿命が長くなるはずの定期交換に対応する新規の MTBF_T(MTTF_T)を設定する必要がある。

このためには、上述のとおり故障率が増加型であるという前提が必要であり、また、(3.7)式のように故障密度関数 f(t)が数式で表されていないと、計算から MTBF_T(MTTF_T)を求めることはできないことがわかる。

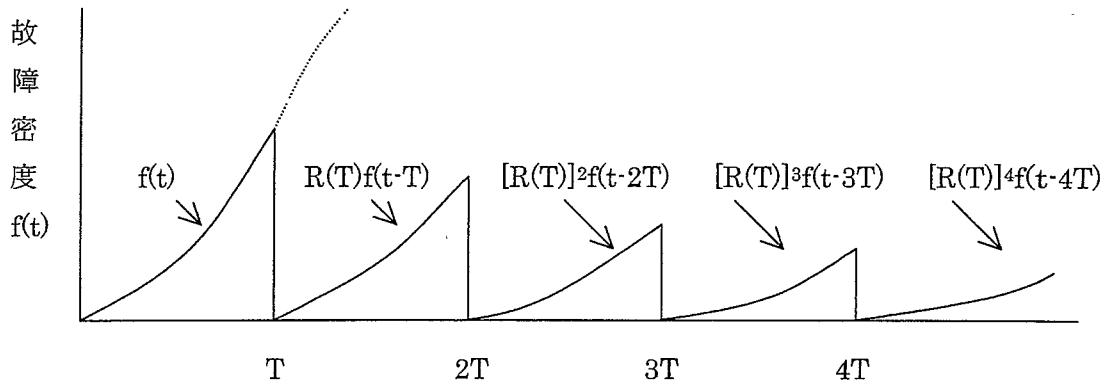
一方、低除染燃料製造プラントを構成する機器・部品について故障密度関数 f(t)を現実に則した数式で表すためには、同様の設備の運転データやカタログデータ等に各機器・部品

の故障密度関数が既に数式として表現されている必要があるが、実際にはほとんど存在しないと考えられる。

しかしながら、3.1 項で述べたように低除染燃料製造プラントを構成する機器・部品について故障率増加型を適用するものとすれば、故障密度関数としては、代表的な故障率増加型である正規分布かワイブル分布を用いて表現するのが一般的と考えられ、上記で述べたように、ワイブル分布では形状パラメータや位置パラメータなどの係数があり、式自体が複雑であるという理由から、ここでは故障密度関数として、寿命の平均値と標準偏差のみで表現される正規分布を用いることとする。

<参考>

定期的に周期 T 時間ごとに交換を行う場合の故障密度の変化は、下図のようになる。
なお、故障率は増加型とした。



このとき、故障密度関数を $f_p(t)$ とすると、MTBF_T(MTTF_T)は定義式より、

$$\begin{aligned} \text{MTBF}_T(\text{MTTF}_T) &= \int_0^\infty t f_p(t) dt \\ &= \sum_{j=0}^{\infty} [R(T)]^j \int_{jT}^{(j+1)T} f(t) dt \end{aligned}$$

$t=jT+x$ として、積分区間を見直すと、

$$\begin{aligned} \text{MTBF}_T(\text{MTTF}_T) &= \sum_{j=0}^{\infty} [R(T)]^j \int_0^T (jT+x) f(x) dx \\ &= \sum_{j=0}^{\infty} jT [R(T)]^j \int_0^T f(x) dx + \sum_{j=0}^{\infty} [R(T)]^j \int_0^T x f(x) dx \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} \int_0^T f(x) dx &= \text{時間 } T \text{ における不稼働率 } (F(T)) \\ &= 1 - R(T) \end{aligned}$$

であり、

$$\sum_{j=0}^{\infty} [R(T)]^j = 1 / (1 - R(T))$$

のため、

$$\begin{aligned} \text{MTBF}_T(\text{MTTF}_T) &= \sum_{j=0}^{\infty} jT [R(T)]^j (1 - R(T)) + \int_0^T x f(x) dx / (1 - R(T)) \\ &= (\sum_{j=0}^{\infty} jT [R(T)]^j (1 - R(T))^2 + \int_0^T x f(x) dx) / (1 - R(T)) \end{aligned}$$

右辺第1項を展開すると、

$$\sum_{j=0}^{\infty} j T [R(T)]^j (1 - R(T))^{-2} = T R(T)$$

となるため、

$$\begin{aligned} MTBF_T(MTTF_T) &= (T R(T) + \int_0^T x f(x) dx) / (1 - R(T)) \\ &= (T R(T) + \int_0^T t f(t) dt) / (1 - R(T)) \\ &= (T R(T) + \int_0^T t f(t) dt) / F(T) \end{aligned}$$

4. 廃棄物発生量プログラムの検討（定期交換と廃棄物発生量の相関）

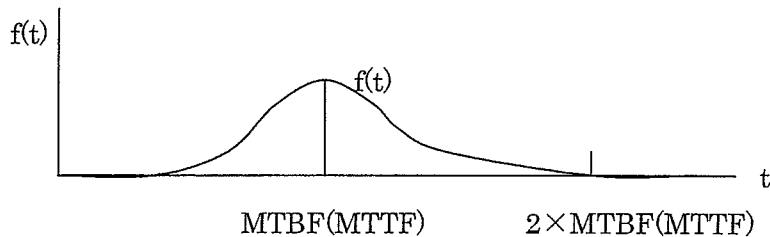
定期交換と廃棄物発生量の相関は、以下の考え方に基づく。

定期交換を行う場合、定期交換時に必ず廃棄物が発生するが、定期交換時以前にも故障率に従い故障が発生し廃棄物となるため、両方の廃棄物量を加えたものが定期交換を行う場合の廃棄物発生量ということになる。

具体的には、以下のようになる。

定期交換が有効になる故障率の型は、3章の検討結果より、故障率が時間とともに増加する故障率増加型である。

故障率増加型では、横軸を時間、縦軸を故障密度分布（確率密度） $f(t)$ で表すと、以下のような分布となる。この代表的な例として正規分布があり、以下、故障密度分布が正規分布すなわち故障密度分布が平均寿命(MTTF)を中心に左右対称であることを前提に説明する。

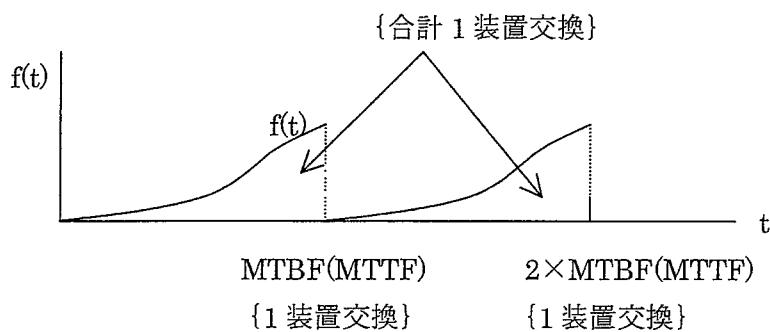


上図のような故障密度分布を持った装置では、 $2 \times \text{MTBF}(\text{MTTF})$ の時間内に必ず 1 回故障し、廃棄物が 1 装置分、発生する。

この設備を $2 \times \text{MTBF}(\text{MTTF})$ の時間間隔に 1 回交換する、すなわち、 $\text{MTBF}(\text{MTTF})$ の時間（平均寿命時）に 1 回交換するという定期交換を行うとすれば、 $2 \times \text{MTBF}(\text{MTTF})$ の時間でもう 1 回交換するので、 $2 \times \text{MTBF}(\text{MTTF})$ の時間内に定期交換による廃棄物が 2 装置分、発生する。

これに加え、時間 0 から 1 回目の定期交換時間である $\text{MTBF}(\text{MTTF})$ 時までにも、故障の可能性が確率 0.5 で存在し、また、1 回目の定期交換により新品となっても 2 回目の定期交換時間である $2 \times \text{MTBF}(\text{MTTF})$ 時までに故障の可能性が確率 0.5 で存在するため、 $2 \times \text{MTBF}(\text{MTTF})$ の時間内に累積故障確率として、 $0.5 + 0.5 = 1$ の故障の可能性がある、すなわち、 $2 \times \text{MTBF}(\text{MTTF})$ の時間内に累積故障確率に基づく廃棄物が 1 装置分、発生する。

このことから、 $\text{MTBF}(\text{MTTF})$ の時間（平均寿命時）に 1 回交換するという定期交換を行うとすれば、定期交換による廃棄物 2 装置分と故障による廃棄物が 1 装置分、合計 3 装置分、廃棄物が発生する。



以上を一般的な考え方へ展開すると、 $2 \times \text{MTBF}(\text{MTTF})$ の時間内に時間 T ごとに定期交換すれば、 $2 \times \text{MTBF}(\text{MTTF})$ の時間内、すなわちこの装置が 100% の確率で故障する時間内では、定期交換回数分発生する廃棄物量 ($2 \times \text{MTBF}(\text{MTTF}) / T$) と、定期交換時までの累積故障確率の定期交換回数分の和（積算値）に相当する廃棄物量が発生することになる。

なお、このような考え方のほかに、定期交換時間以前に故障が発生して交換を行った場合、この交換時刻を 0 時刻としてこれに定期交換間隔分を加え、次の定期交換時間として設定し直す方法もある。

この方法では、上記の方法に比べ定期交換時刻が後ろにずれるため、交換回数が少なくなる、すなわち、廃棄物発生量は少なくなるが、実際のプラント操業では年運転計画の中で適切に保守期間を設定し定期交換を行うことを考えると、運転中に定期交換時刻がきてしまう可能性があり、プラント操業計画にはそぐわないと考えられるため、今回の検討対象外とする。

5. 定期交換を考慮した稼働率と廃棄物発生量の計算結果

5.1 定期交換と MTBF_T(or MTTF_T)の関係

図 5.1-1 および図 5.1-2 に、故障密度分布（確率密度） $f(t)$ が正規分布を持つ故障率増加型の装置における標準偏差をパラメータとした場合の、定期交換を行った時の MTBF_T(or MTTF_T)の変化について示す。

μ は正規分布の平均であり、分かり易くするため、横軸のフルスパンを $2 \times \text{MTBF}(\text{MTTF}) (=1000 \text{ 単位時間とおく。以降、これを } 1000 \text{ 時間と記載する})$ 、すなわち、定期交換を行わなければ確率 100%で故障する時間長さとし、 $\mu = \text{MTBF}(\text{MTTF}) = 500 \text{ 時間}$ である。

ここで、図 5.1-1 は MTBF_T(or MTTF_T)を(3.4)式を用いて算出したもので、図 5.1-2 は(3.7)式を用いて算出したものである。

(3.4)式と(3.7)式の違いは、3 章で述べたとおり新品時の故障確率を考慮しているかどうかであり、図 5.1-1 と図 5.1-2 を比較すると分かるように、新品時の故障確率が小さい標準偏差を与える $\sigma = 200$ 以下（黒、茶、赤、橙ライン）では、MTBF_T(or MTTF_T)は、図 5.1-1 と図 5.1-2 でほぼ一致し、それ以上の標準偏差の場合、次第にそれが大きくなり、新品時の故障確率を考慮している図 5.1-2 のほうが MTBF_T(or MTTF_T)が小さくなることがわかる。

すなわち、故障密度分布を正規分布で表現しているため、標準偏差を大きく設定すると新品時の故障確率が大きくなり、MTBF_T(or MTTF_T)に与える影響が無視できなくなる。

このことから、標準偏差の大小に係わらず対応可能な(3.7)式を用いてシミュレーションした図 5.1-2 について、検討する。

図 5.1-2 において、黒ラインのケースは次のようになる。

黒ラインは、標準偏差が小さいため、故障密度分布（図中、下方の黒ライン）は鋭い山の形をしており、つまり、平均寿命付近での故障の発生割合が高いケースであるが、逆に言うと、運転開始～300 時間ではほとんど故障が発生しない。

このようなケースでは、300 時間までの定期交換間隔では、寿命は非常に長くなり、MTBF_T(or MTTF_T)（図中、上方の黒ライン）は、平均寿命である 500 時間を大幅に上回る。

400 時間より長い定期交換間隔では、急激に故障が増えていく時間帯での交換となるため、MTBF_T(or MTTF_T)も急激に低下し、600 時間より長い定期交換間隔になると、ほとんど故障状態になってからの交換のため、MTBF_T(or MTTF_T)は平均寿命である 500 時間に近い値となる。

図 5.1-2 の緑ラインは標準偏差が大きく、故障密度分布は平坦な山の形をしているが、時間 0 において故障密度が 0 ではない、すなわち、初期故障が発生する可能性が比較的高いという特性を有している。このため、運転開始から 100 時間弱での定期交換間隔では、定期交換しても初期トラブルにより故障する可能性が高く、定期交換を行わない場合の MTBF(MTTF)=500 時間よりも MTBF_T(or MTTF_T)が小さな値となっている。

その後、150 時間あたりでの定期交換間隔で MTBF_T(or MTTF_T)はピークとなり、その後、

黒ラインと同様、故障密度の増加に伴い、 $MTBF_T$ (or $MTTF_T$)は低下するが、700時間以上の交換間隔では $MTBF(MTTF)=500$ 時間より下回り始める。これは、標準偏差が大きく、新品時に既に故障しているものが存在するためであり、その分、平均寿命は低下することになる。

図 5.1-2 の紫ラインでは、故障密度分布がさらに平坦になっているため、 $MTBF_T$ (or $MTTF_T$)は初期故障の影響をさらに受けやすく、定期交換間隔が運転開始から 300 時間までは $MTBF_T$ (or $MTTF_T$)は上昇している。また、定期交換が $MTBF_T$ (or $MTTF_T$)に与える効果も最大で 1.5 倍程度と黒ラインに比べ非常に小さくなっている。

5.2 定期交換と稼働率および廃棄物発生量の関係

図 5.2-1 に定期交換を行う場合の稼働率および廃棄物発生量を示す。図 5.2-1a/b/c/d は、それぞれ故障密度分布(図中では確率密度と記載している)の正規分布の標準偏差 σ を 50、100、200、300 と変化させた場合の稼働率および廃棄物発生量について表している。

図中の線は、それぞれ紺ラインが故障密度分布(図中では確率密度と表記)、桃ラインがそれに基づく累積故障割合、緑ラインが定期交換後の稼働率、茶ラインが定期交換に基づく廃棄物発生量、黄ラインが 4 章で述べた定期交換までの累積故障確率に基づく廃棄物発生量、青ラインが全廃棄物発生量(茶ライン+黄ライン)である。

図 5.2-1a では、故障密度分布が鋭い山の形をしている、すなわち、故障が時間経過に従って、急激に増加するパターンであるが、定期交換間隔が 400 時間あたりまでは、ほとんど故障が発生しないため、この時間帯での定期交換により、 $MTBF_T$ (or $MTTF_T$)は非常に長くなり、その結果、稼働率はほぼ 100%となる。廃棄物発生状況は、定期交換頻度が多い分、定期交換ごとの廃棄物発生量は多いが、故障する前に定期交換するため、累積故障確率に基づく廃棄物量はほとんど発生しない。定期交換間隔が 400 時間から 600 時間の時間帯では、故障が集中して発生する時間帯での交換のため、 $MTBF_T$ (or $MTTF_T$)が急激に平均寿命である 500 時間に近づく、すなわち、稼働率が定期交換しない場合の数値($MTBF=500$ 、 $MTTR=200$ で設定($MTTR$ はグラフでの稼働率変化が分かるよう大きな値を設定)しているため、 $500/(500+200)=0.714$)に急激に低下していく。廃棄物発生量は、故障の多発により累積故障確率に基づく廃棄物発生量が急激に増加し、500 時間付近で最大値 1 となる。また、定期交換ごとの廃棄物発生量をえた全廃棄物量は、定期交換間隔が 400 時間以降で一旦増加し、再び減少するという傾向を見せる。

図 5.2-1c あるいは図 5.2-1d では、時間 0 から故障が発生するパターンのため、初期故障による累積故障確率に基づく廃棄物発生量が多く、また、稼働率も運転初期は低下している。つまり、初期故障が多くなるほど、短い定期交換間隔では稼働率は低下し、廃棄物量も増えるということが分かる。

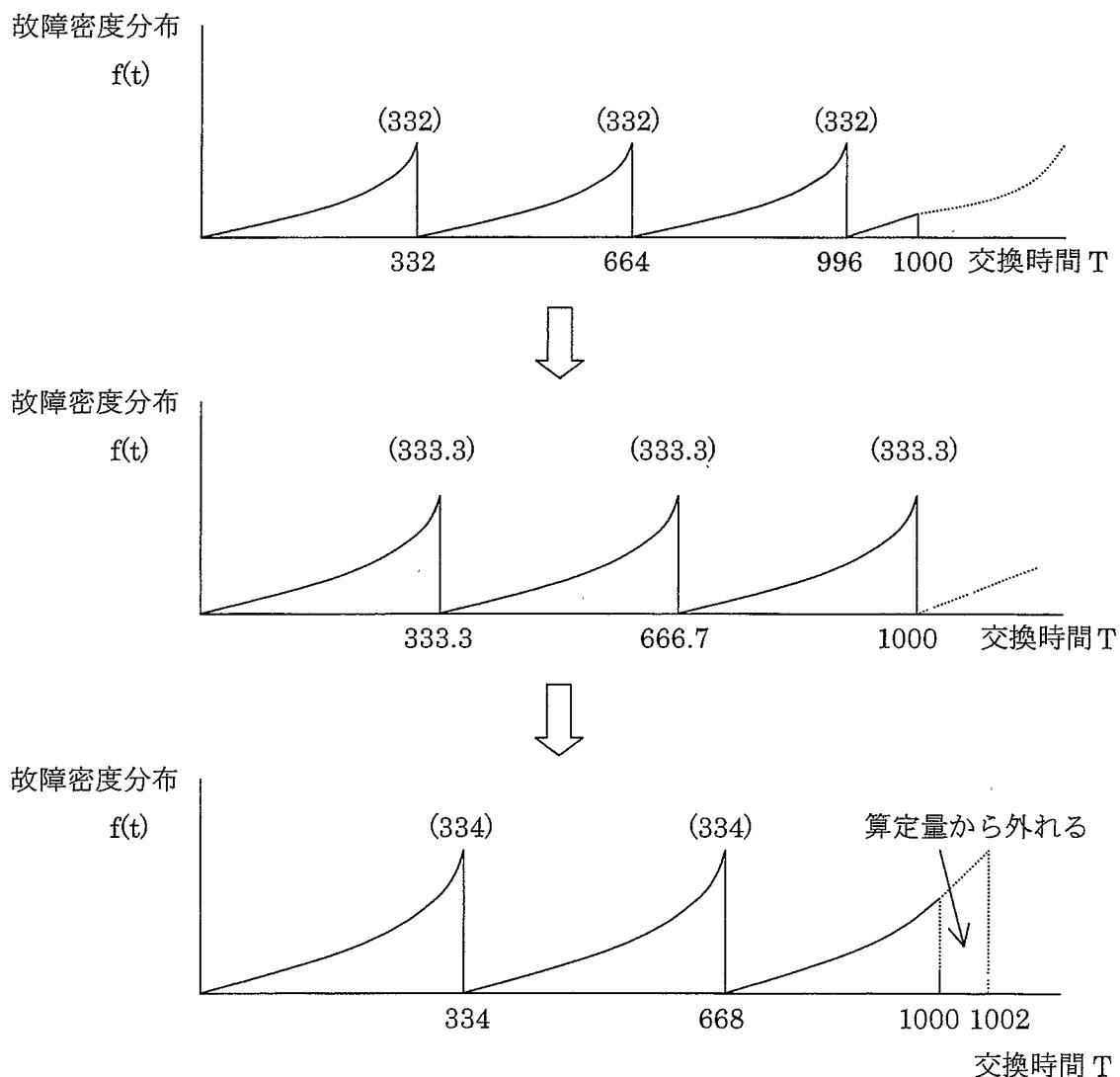
以上のことから、故障率増加型であっても定期交換すれば必ず稼働率が増加するとは限らず、また、故障率増加の傾向や故障密度分布の形により、稼働率および廃棄物発生量を

最適に維持できる定期交換間隔があることが分かった。

なお、交換時間が 500 時間以下の領域において累積故障確率に基づく廃棄物発生量が不連続になっているグラフがあるが、これは次の理由によると考えられる。

例えば、次図のように、定期交換を 332 時間間隔から 334 時間間隔に連続的に延ばしていく場合、333.3 時間を境に故障密度分布（確率密度）が 4 サイクルから 3 サイクルになり、これに伴い、334 時間間隔では 3 サイクル目の最後の部分である故障密度が立ち上がったところ、すなわち、故障密度の大きい部分が 1000 時間以上の領域となり、算定量から外れることがわかる。これにより、累積故障確率に基づく廃棄物発生量が不連続となるのである。

この考え方に基づくと、不連続になる定期交換間隔は 250 時間、200 時間、166 時間など、1000 時間に對して整数の交換回数で割り算した定期交換間隔の時間で不連続となるはずであるが、図 5.2-1c あるいは図 5.2-1d は、これを良く表している。



また、図 5.2-1dにおいて、例えば交換時間が 500 時間の手前で累積故障確率に基づく廃棄物発生量が 1 を超えている（言い方を代えると、累積故障確率に基づく廃棄物発生量が不連続になる定期交換間隔 250 時間、200 時間、166 時間などにおいて、その前後で、ある値分、廃棄物発生量が低下している、もしくは、交換時間が 10 時間とか 20 時間とかの短い交換間隔の時に累積故障確率に基づく廃棄物発生量が非常に大きな値になっている）が、これは図 5.2-1d のような標準偏差が大きい場合は、新品時に既に、ある確率で故障しているため、定期交換直後にこの確率分が必ず上乗せされるためであり、例えば、定期交換間隔を 1 時間とし、新品の故障確率が 5% とすれば、1000 時間という時間間隔では、 $1000 \times 0.05 = 50$ 個の廃棄物分が上乗せされることになる。

5.3 プラント全体の定期交換と稼働率および廃棄物量の関係

表 5.3-1 に、シミュレータ計算（詳細は「低除染ペレット燃料製造ライン構成の調査」（三菱マテリアル株式会社）⁽²⁾参照）において、各バッファ容量を 4 日分、最大機器処理能力を通常の 1.5 倍としたときの、プラント全体の定期交換と稼働率および廃棄物量の関係を示す。計算における運転補正係数の設定は表中に示した。

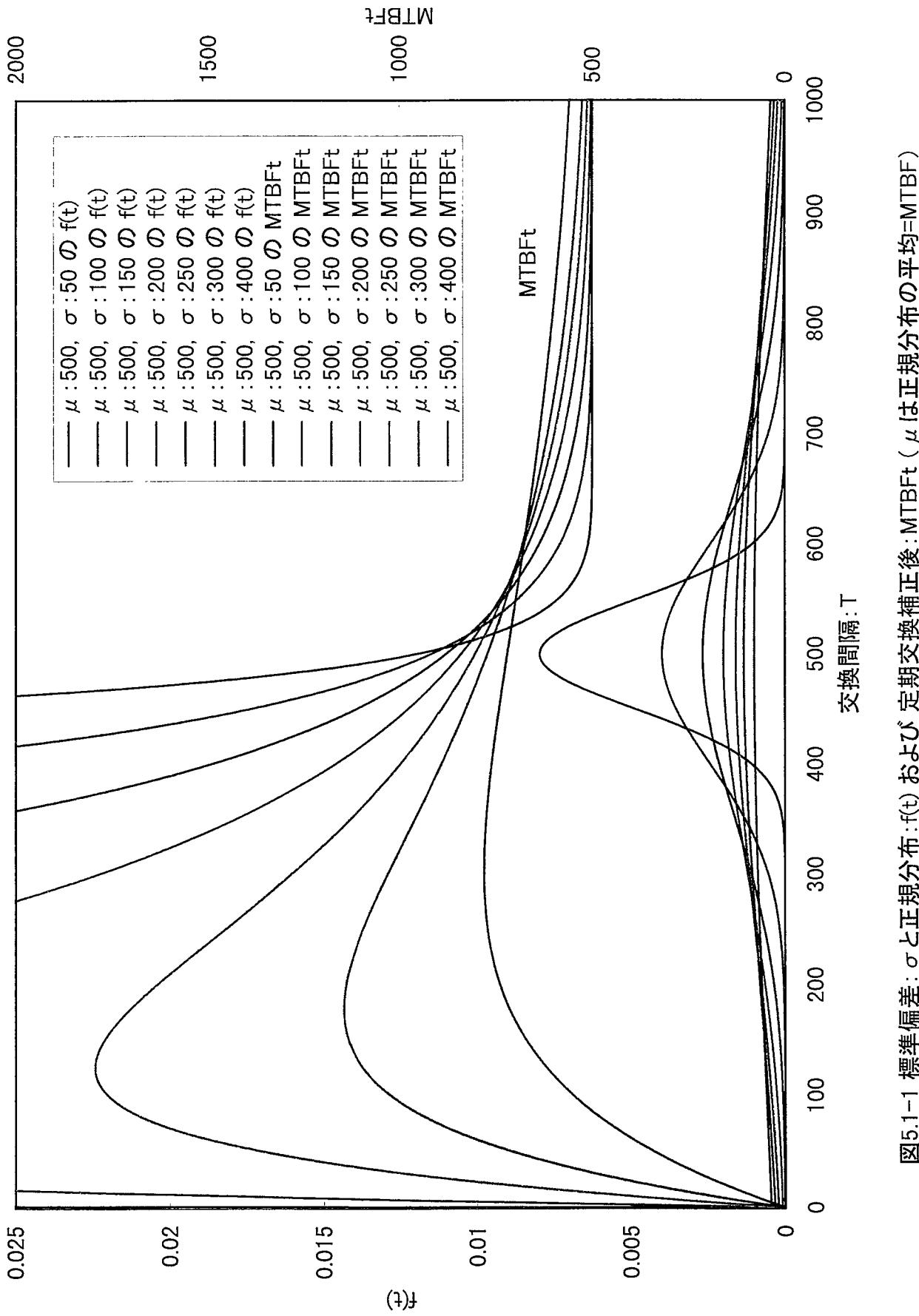
本表では、累積故障確率が MTBF 近傍に集中するケース（標準偏差を 20）およびなだらかな確率分布となるケース（標準偏差を 500）の 2 通りのケースにおいて、ペレット成型からペレット検査までの工程の各ユニットを標準 MTBF の半分の時間で定期交換した場合（すなわち、各ユニットがあまり故障しない期間で定期交換した場合）および MTBF の間隔で定期交換した場合（合計 4 ケース）と、定期交換しない場合とのプラント全体の稼働率と廃棄物発生量との比較結果を示している。4 ケースともプラントの稼働率は標準偏差や定期交換間隔に関わらず、ほとんど同等である一方、廃棄物量は標準偏差 500 のケースで定期交換により大幅に増加（標準偏差 20 では変わらない）していることがわかる。

これらの各ケースについて結果を纏めたものが表 5.3-2 である。

これらの結果から、各機器が高稼働率であり、定期交換無しでもプラント全体として上限の稼働率（80%）がほぼ確保されている場合には、定期交換による稼働率上昇効果が現れづらいことが分かる。

このようなケースでは、定期交換は廃棄物発生量を増やすだけのマイナスの効果しかなく、定期交換については、対象となるプラントに応じて、本シミュレータを用いて最適化することが重要と考えられる。

なお、廃棄物重量を算出するためには、「低除染ペレット燃料製造ライン構成の調査」（三菱マテリアル株式会社）⁽²⁾の表 7.2-1 の各設備機器の重量データを用いた。表の機器設備には多くの構成部品が示されているが、本検討での廃棄物重量としては、影響の小さい軽量部品を省略し、各ユニットのうち最も重量のある部品のみ 2 年に 1 回交換する（大部分が 2 年に 1 回交換すると仮定している）として計算した。

図5.1-1 標準偏差: σ と正規分布: $f(t)$ および 定期交換補正後: MTBF t (μ は正規分布の平均=MTBF)

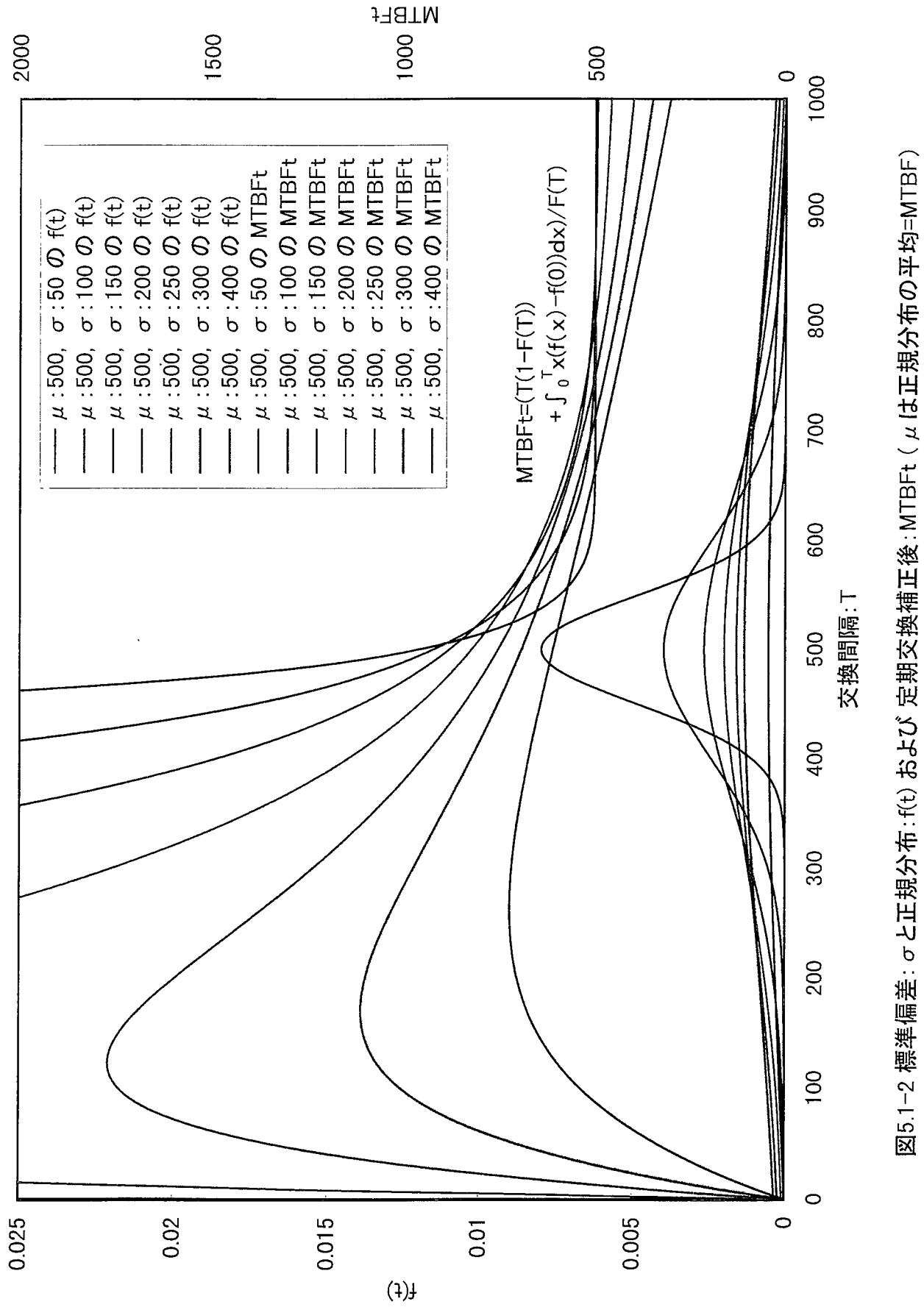


図5.1-2 標準偏差: σ と正規分布: $f(t)$ および 定期交換補正後: MTBF_t (μ は正規分布の平均= MTBF)

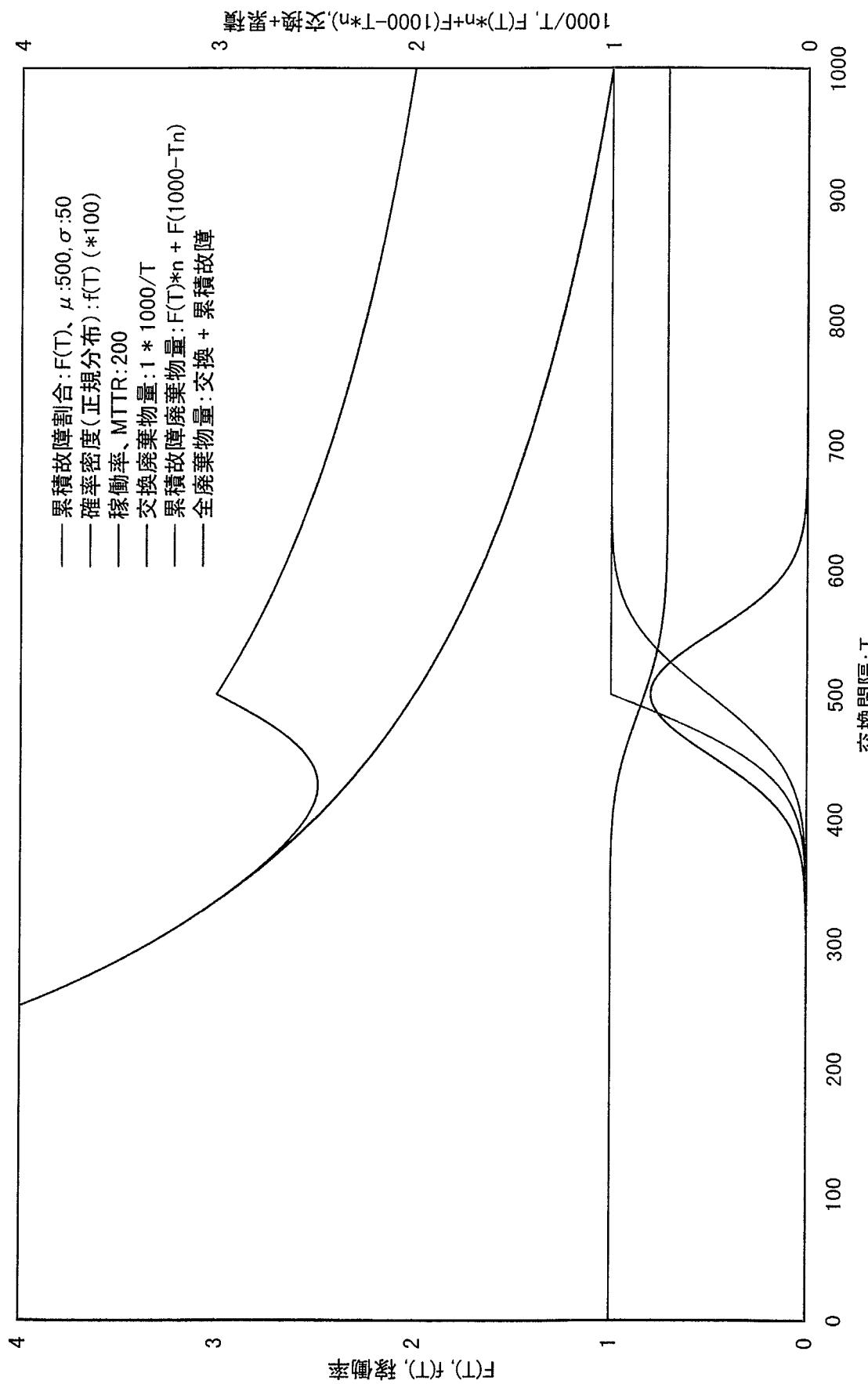


図5.2-1a 標準偏差: $\sigma=50$ 、定期交換廃棄物量(全交換):(交換+交換時累積故障)*廃棄物係数 (2*MTBF=1000)

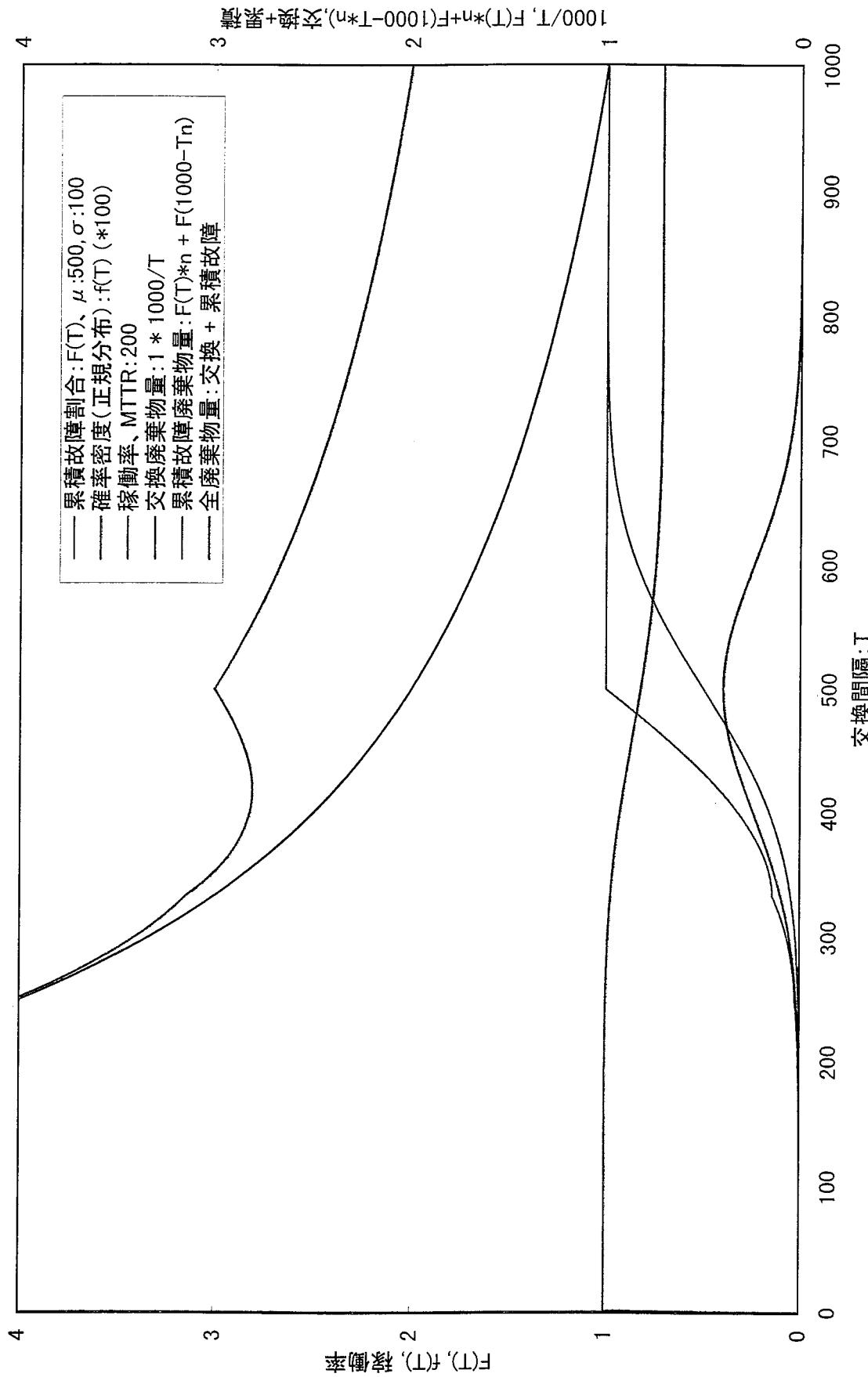


図5.2-1b 標準偏差: $\sigma=100$ 、定期交換廃棄物量(全交換):(交換+交換時累積故障)*廃棄物係数 (2*MTBF=1000)

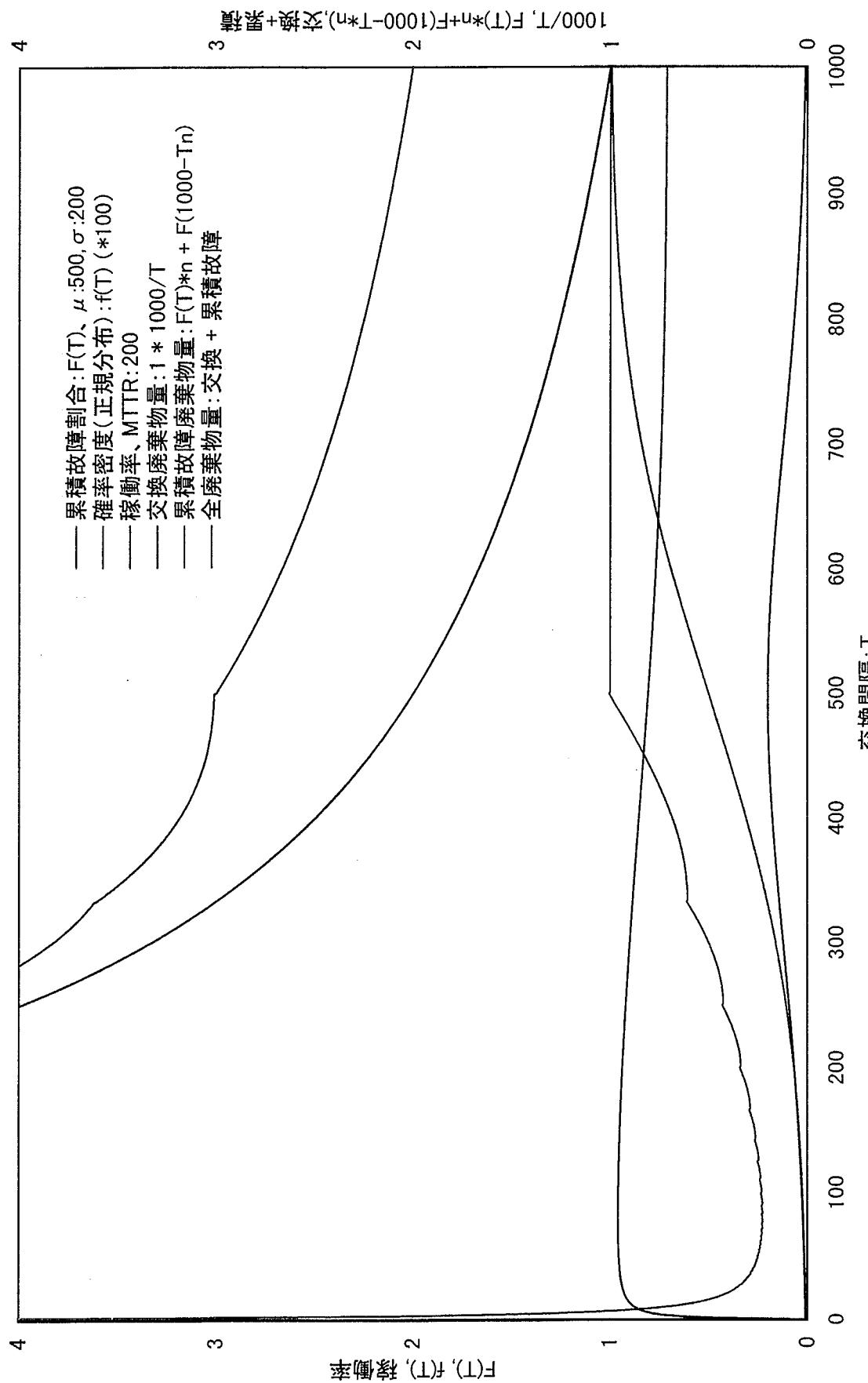


図5.2-1c 標準偏差: $\sigma=200$ 、定期交換廃棄物量(全交換): (交換+交換時累積故障)*廃棄物係数 (2*MTBF=1000)

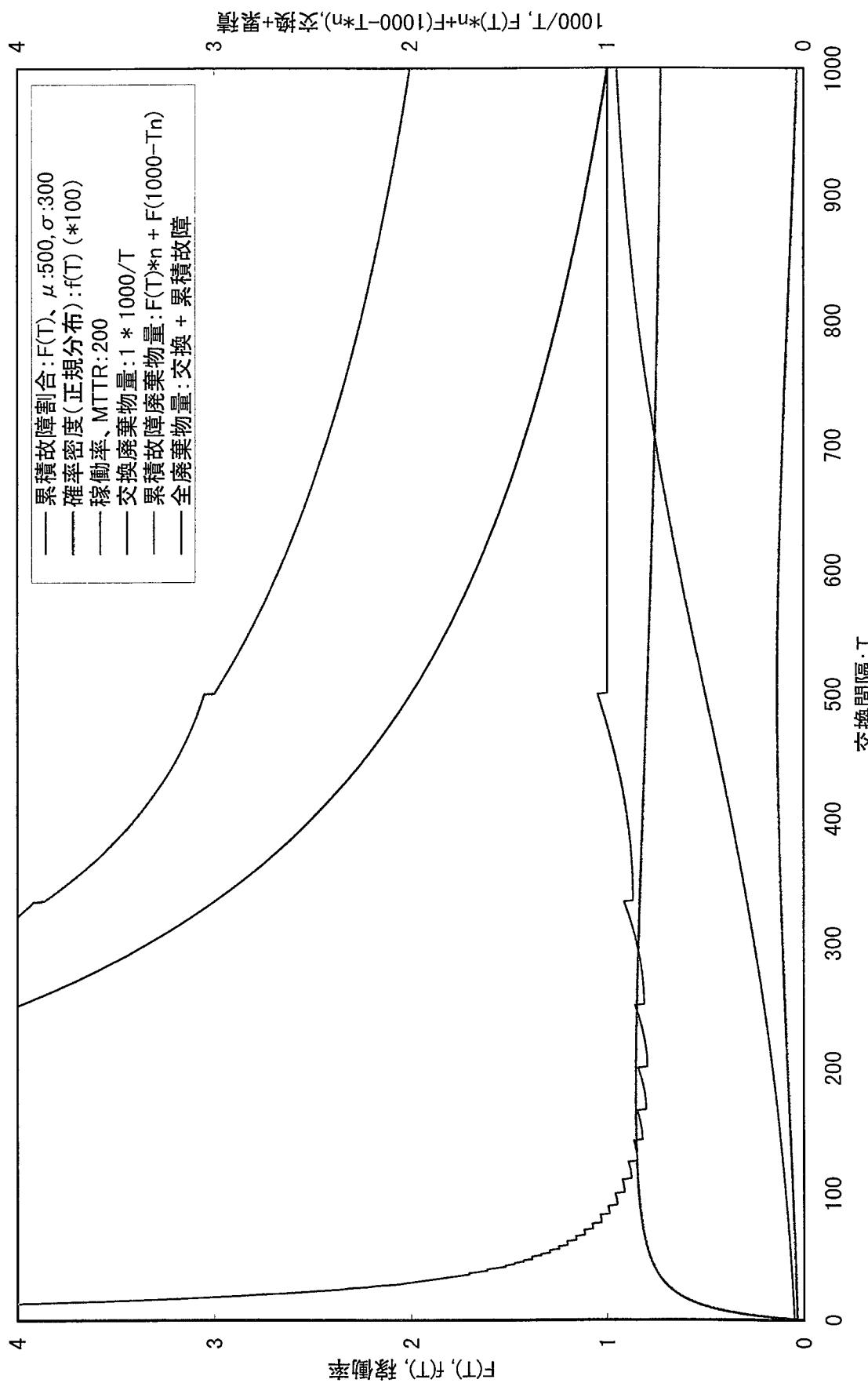


図5.2-1d 標準偏差: $\sigma = 300$ 、定期交換廃棄物量(全交換): (交換+交換時累積故障)*廃棄物係数 (2*MTBF=1000)

表5.3-1 (1/4) プラント全体の定期交換と稼働率および廃棄物量の関係(ケース1)

表5.3-1 (2/4) プラント全体の定期交換と稼働率および廃棄物量の関係(ケース2)

プロック名	種別	処理プロック			定期交換補正パラメータ			定期交換補正計算			定期交換なし		
		標準MTBF	修理時間MTTR	補正前稼働率	定期交換間隔	標準偏差 σ	機器重量(kg)	補正後MTBF(MTTR)	補正後稼働率	定期交換間隔	廃棄物量*	定期交換期間	運転期間
P検査AGVa	処理(MTTR=1)	500	1.098004	250	20	5	1E+308	1	200	40	55	11	$\sigma = 20$
P検査ベアレット挿入装置a	処理(MTTR=1)	500	1.098004	250	20	30	1E+308	1	1200	40	330	11	定期交換間隔=0.5MTBF
P検査移動装置a	処理(MTTR=1)	500	0.998004	250	20	30	1E+308	1	800	40	220	11	
P検査寸法密度自動測定装置a	処理(MTTR=1)	500	0.998004	250	20	30	1E+308	1	1200	40	330	11	「定期交換補正計算」および「定期交換なし」の「運転期間(廃棄物量*)」の単位はkg
P検査波形トレーリング装置a	処理(MTTR=1)	500	1.098004	250	20	25	1E+308	1	1000	40	275	11	
P検査AGVb	処理(MTTR=1)	500	1.098004	250	20	5	1E+308	1	200	40	55	11	
P検査移動装置b	処理(MTTR=1)	500	1.098004	250	20	30	1E+308	1	1200	40	330	11	
P検査寸法密度自動測定装置b	処理(MTTR=1)	500	0.998004	250	20	30	1E+308	1	800	40	220	11	
P検査波形トレーリング装置b	処理(MTTR=1)	500	1.098004	250	20	25	1E+308	1	1000	40	275	11	運転特性補正係数の設定値
成型AGVa	処理(MTTR=1)	500	1.098004	250	20	5	1E+308	1	200	40	55	11	
成型フレスユニットa	処理(MTTR=1)	500	1.098004	250	20	5	1E+308	1	200	40	55	11	補正後MTBF $= (C-Q*R - (S*T-S)) * U * V * W * X$
成型フレス用モータAa	処理(MTTR=1)	2500	1.09996	1250	20	50	1E+308	1	400	8	100	2	
成型フレス用モータBa	処理(MTTR=1)	500	1.09996	1250	20	50	1E+308	1	400	8	100	2	
成型フレット移動装置a	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	20	1E+308	1	1000	40	220	11	
成型フレット移動装置a	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	20	1E+308	1	800	40	200	11	
成型フレット移動装置a	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	25	1E+308	1	1000	40	225	11	C(標準MTBF):MTBFの入力値
成型フレット押込装置a	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	25	1E+308	1	1000	40	225	11	R(作動回数補正係数):未考慮
成型フレット測定装置a	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	3	1E+308	1	120	40	33	11	S(ドーカ運転時間補正係数):未考慮
成型ドーパーレット移動装置a	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	25	1E+308	1	1000	40	225	11	T(ドーカ運転時間補正係数):10時間
成型AGVb	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	5	1E+308	1	200	40	55	11	
成型フレスユニットb	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	5	1E+308	1	200	40	55	11	
成型フレス用モータAb	処理(MTTR=1)	2500	1.09996	1250	20	50	1E+308	1	400	8	100	2	
成型フレス用モータBb	処理(MTTR=1)	500	1.09996	1250	20	50	1E+308	1	400	8	100	2	
成型フレット多軸装置b	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	20	1E+308	1	1000	40	220	11	
成型フレット移動装置b	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	25	1E+308	1	1000	40	225	11	
成型フレット伸出版装置b	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	25	1E+308	1	1000	40	225	11	X(負荷補正係数):未考慮
成型フレット押込装置b	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	25	1E+308	1	1000	40	225	11	
成型フレット測定装置b	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	25	1E+308	1	1000	40	225	11	
研削AGVa	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	2	1E+308	1	800	40	220	11	
研削ペレット伸出版装置b	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	25	1E+308	1	1000	40	225	11	
研削ペレット測定装置b	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	3	1E+308	1	120	40	33	11	
研削ドーパーレット移動装置b	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	25	1E+308	1	1000	40	225	11	
研削センターステップa	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	5	1E+308	1	200	40	55	11	プラント稼働率(定期交換なし):79.5%
研削センターステップa	処理(MTTR=1)	2500	1.09996	1250	20	100	1E+308	1	800	8	200	2	
研削センターステップb	処理(MTTR=1)	500	1.09996	1250	20	50	1E+308	1	400	8	100	2	
研削センターステップb	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	25	1E+308	1	1000	40	225	11	
研削センターステップb	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	5	1E+308	1	200	40	55	11	
研削センターステップb	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	100	1E+308	1	4000	40	1100	11	
研削センターステップb	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	50	1E+308	1	1000	40	225	11	
研削センターステップb	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	25	1E+308	1	1000	40	225	11	
研削センターステップb	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	5	1E+308	1	200	40	55	11	
研削センターステップb	処理(MTTR=1)	500	1.099804	250	20	15	1E+308	1	120	8	30	2	
研削センターステップb	処理(MTTR=1)	1250	1.0999201	625	20	10	1E+308	1	160	16	4252618		
研結余材a	処理(MTTR=1)	1250	1.0999201	625	20	10	1E+308	1	160	16	4252618		
研結余材b	処理(MTTR=1)	1250	1.0999201	625	20	10	1E+308	1	160	16	4252618		
研結余材c	処理(MTTR=1)	1250	1.0999201	625	20	10	1E+308	1	160	16	4252618		
研結余材d	処理(MTTR=1)	1250	1.0999201	625	20	10	1E+308	1	160	16	4252618		
以上、金属廃棄物の合計									28560	1440	7760,105	333,0105	
焼結焼結炉a	処理(MTTR=1)	1250	1.0999201	625	20	3000	1E+308	1	48000	16	12757,85	4,252618	
焼結焼結炉b	処理(MTTR=1)	1250	1.0999201	625	20	3000	1E+308	1	48000	16	12757,85	4,252618	
以上、セラミクスの合計									96000	32	255,71	3,505236	

表5.3-1 (3/4) プラント全体の定期交換と稼働率および廃棄物量の関係(ケース3)

表5.3-1 (4/4) プラント全体の定期交換と稼働率および廃棄物量の関係(ケース4)

表5.3-2 低除染燃料ペレット製造プラント稼働率

ケースNo.	1	2	3	4	備考
定期交換実施時の間隔	MTBFと同じ	MTBF×0.5	MTBFと同じ	MTBF×0.5	その他の計算条件: バッファ4日分(成型前、研削 前、検査前) バッファ吐出量1.5倍
標準偏差 σ	20	20	500	500	
ペレット搬送不良停止割合	20%	20%	20%	20%	
運転特性補正後の稼働率を用いた場合 (定期交換をしない場合)	79.5%	79.5%	79.5%	79.5%	
定期交換補正後のプラント稼働率を 用いた場合のプラント稼働率	79.5%	79.7%	79.6%	79.6%	
廃棄物 発生個数	定期交換なし 10000日運転時 (個)	金属 393 セラミクス 8.5	金属 393 セラミクス 8.5	金属 405 セラミクス 8.5	金属 405 セラミクス 9.0
	定期交換実施 10000日運転時 (個)	金属 1438 セラミクス 32	金属 1440 セラミクス 32	金属 1128 セラミクス 32	金属 1905 セラミクス 37
廃棄物 発生量	定期交換なし 10000日運転時 (kg)	金属 7760 セラミクス 25516	金属 7760 セラミクス 25516	金属 7976 セラミクス 26936	金属 7976 セラミクス 26936
	定期交換実施 10000日運転時 (kg)	金属 28527 セラミクス 96000	金属 28560 セラミクス 96000	金属 22475 セラミクス 77197	金属 37379 セラミクス 111815

6. 燃料製造システムの特性比較

本改良シミュレータを、振動充填燃料製造システム（湿式ゲル化および乾式）に適用し、ペレットシステムとの比較を行った。本シミュレータでは、燃料製造システムの稼働率ならびに廃棄物発生量の計算を行うことができるが、比較対象のペレット、湿式ゲル化振動充填、乾式振動充填の 3 システムについて入力データがある程度そろう稼働率について、システム安定性の指標として試算を行った。

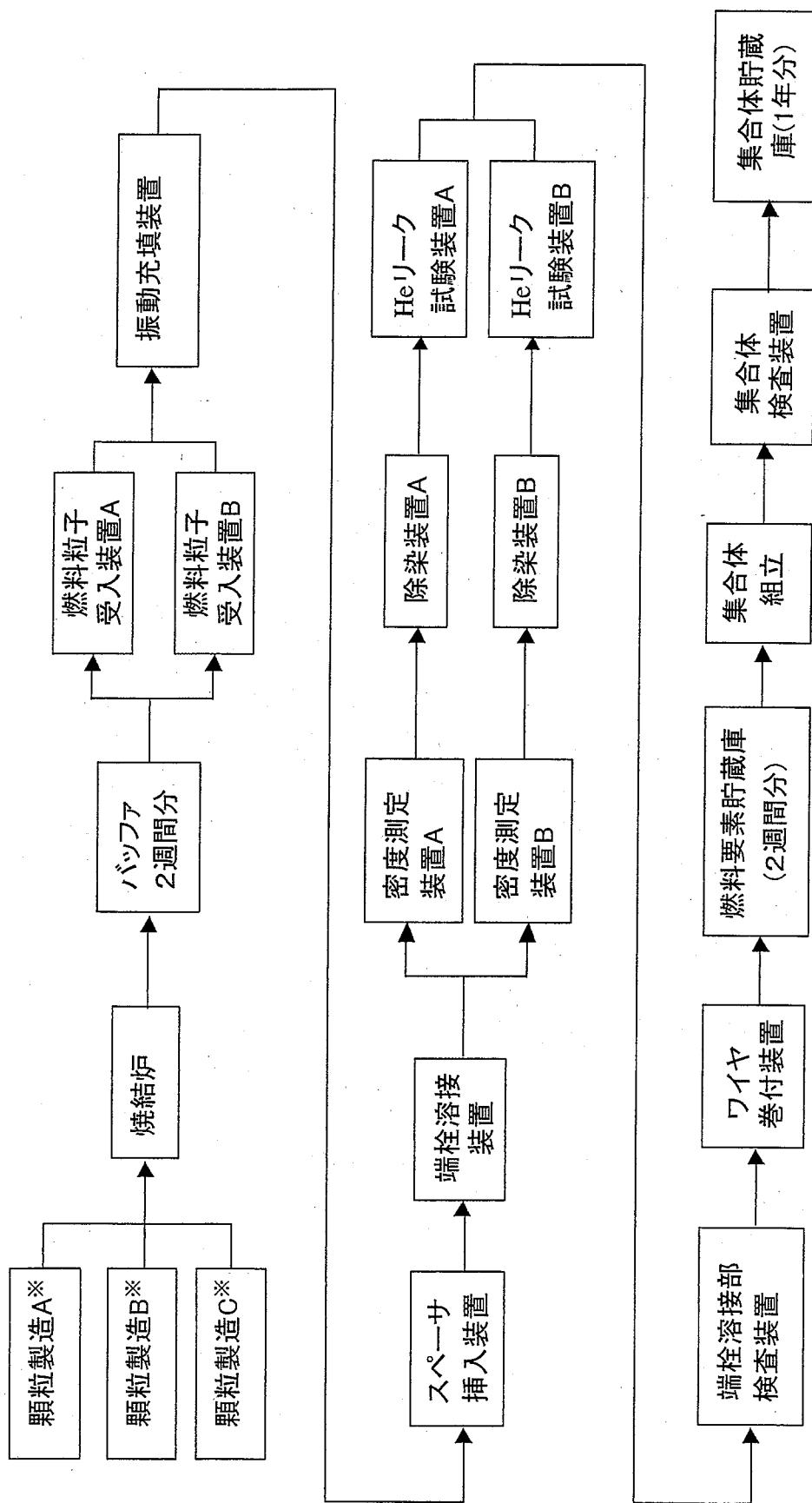
なお、環境負荷低減性の指標となる廃棄物発生量の計算・検討に関しては、乾式振動充填システムで入力データ（交換部品等の重量データ）が不足しているため、今後の課題とする。

6. 1 システム稼働率の計算

燃料製造システムの稼働率の計算範囲として、上流側はペレットシステムおよび湿式ゲル化振動充填システムに関して、プルトニウム富化度調整済みの混合硝酸溶液の受入工程からとし、乾式振動充填システムに関しては、電解採取した析出物を粉碎・塩除去した後の分級工程からとした。下流側については 3 システム共通で燃料集合体の貯蔵工程までとした。

比較対象とするペレットシステムの稼働率計算結果としては、脱硝転換工程の稼働率 80.31%⁽⁷⁾（昨年度の設定では構成部品全体を稼働率低下に寄与するものしたため、低めの稼働率となっている。実際には計画停止期間に実施可能な部品交換が多いため、運転期間内の交換頻度は低く、稼働率としては高くなると考えられ、今後の見直しが必要である。）を用いることを前提としたときの最大稼働率に、合理的条件設定の範囲で近づけることができる 79.8%を用いることとした（脱硝転換工程の前段にはバッファの設置が困難であるため、システム全体の稼働率は同工程の稼働率で頭打ちになる）。79.8%の計算条件では、成形、焼結、研削およびペレット検査工程前段のバッファ容量を 6 日分、ペレット貯蔵庫、燃料要素貯蔵庫、燃料集合体貯蔵庫の容量をそれぞれ 1 ヶ月分、2 週間分、1 年分とし、ペレット加工工程機器全般にバッファ蓄積時に通常処理能力の 1.2 倍（機器設計のリファレンス条件）の運転を行うこととしている（「低除染ペレット燃料製造ライン構成の調査」（三菱マテリアル株式会社）⁽⁸⁾ の 5 章、表 5.2-4 参照、ペレットシステムのプロセスフローに関しては図 5.2-1 参照）。

これに対して、ペレットシステムとの比較のために今回シミュレーション計算を行った湿式ゲル化振動充填システム、乾式振動充填システムのプロセスフローシートを内側炉心燃料（湿式ゲル化振動充填では内側炉心燃料の大粒径粒子）製造の例で、図 6.1-1 および図 6.1-2 に示し、シミュレータフローを図 6.1-3 から図 6.1-5 に示した。湿式ゲル化振動充填システムのシミュレータフローについては煩雑となるため顆粒製造工程を階層化しており、上段の階層を図 6.1-3 に、下段の階層について図 6.1-4 に示した。



※ 滴下液混合、ゲル化(滴下、熟成、洗浄、乾燥)、焙焼、還元の各工程と乾燥後、焙焼、還元後の3ヶ所にバッファ(各7日分)を含む (図6.1-4参照)

図6.1-1 湿式ゲル化振動充填フロー

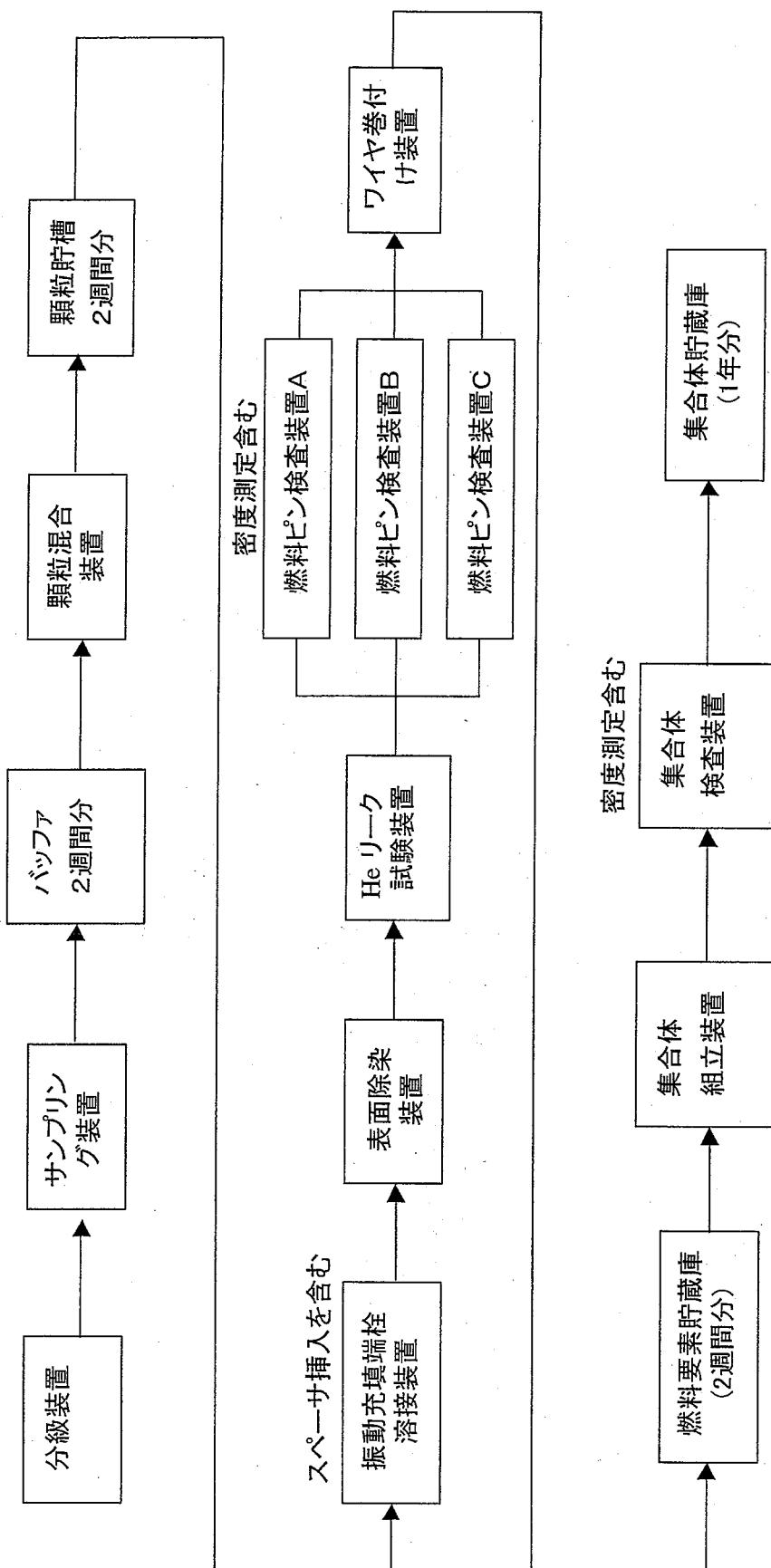


図6.1-2乾式振動充填フロー

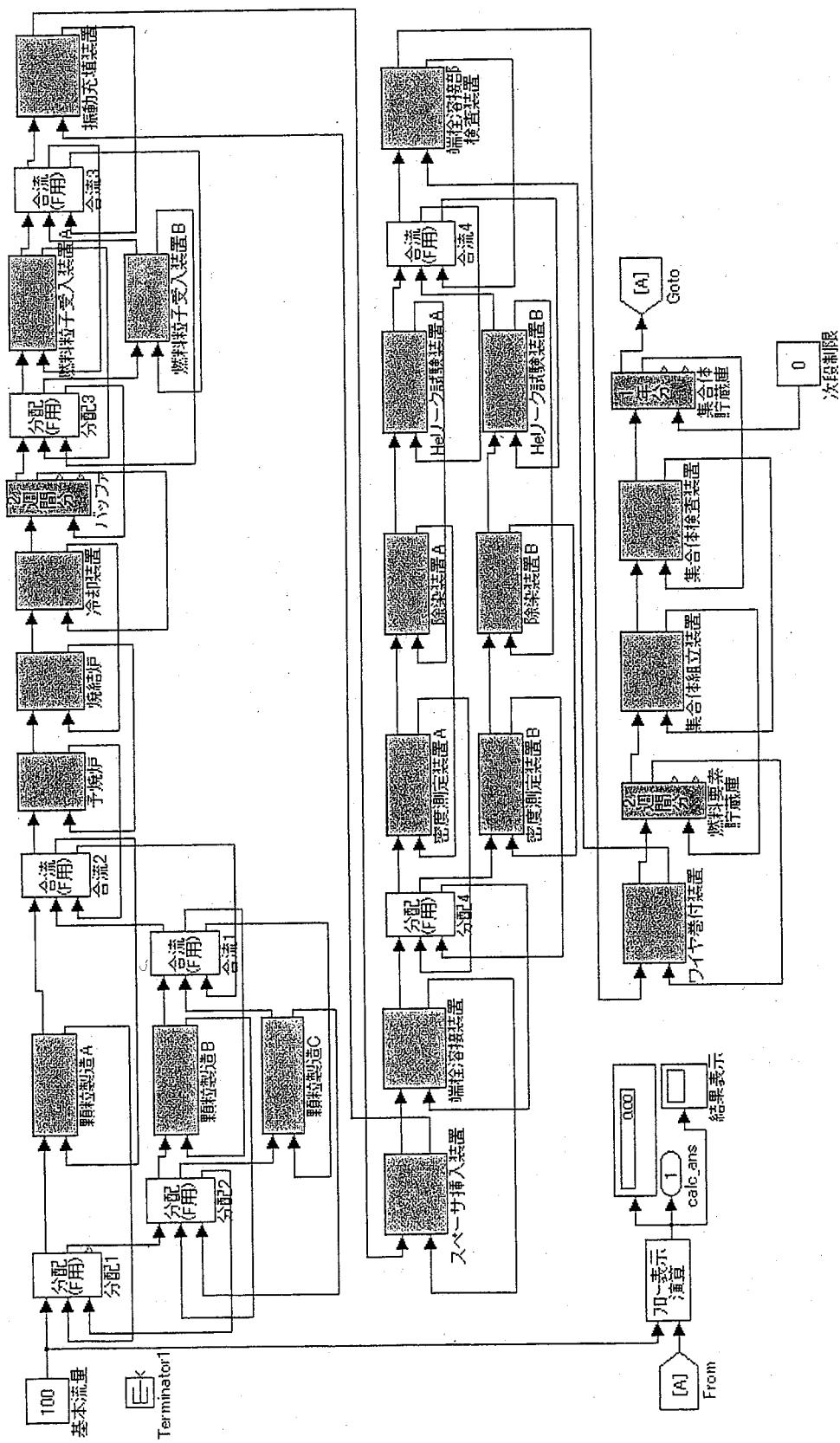


図6.1-3 濡式ゲル化シミュレータフロー

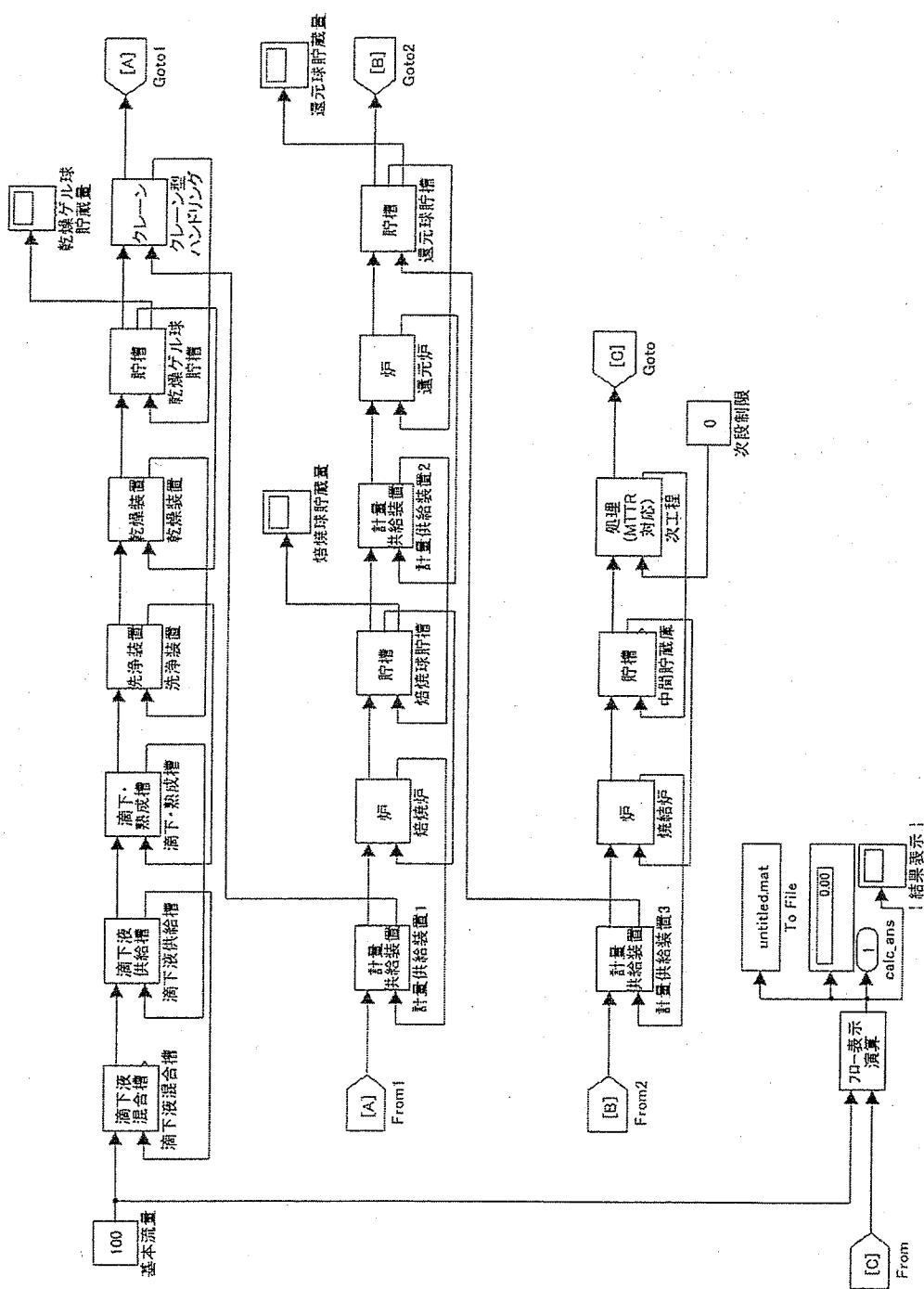


図 6.1-4 湿式ゲル化階層フロー図（顆粒製造）

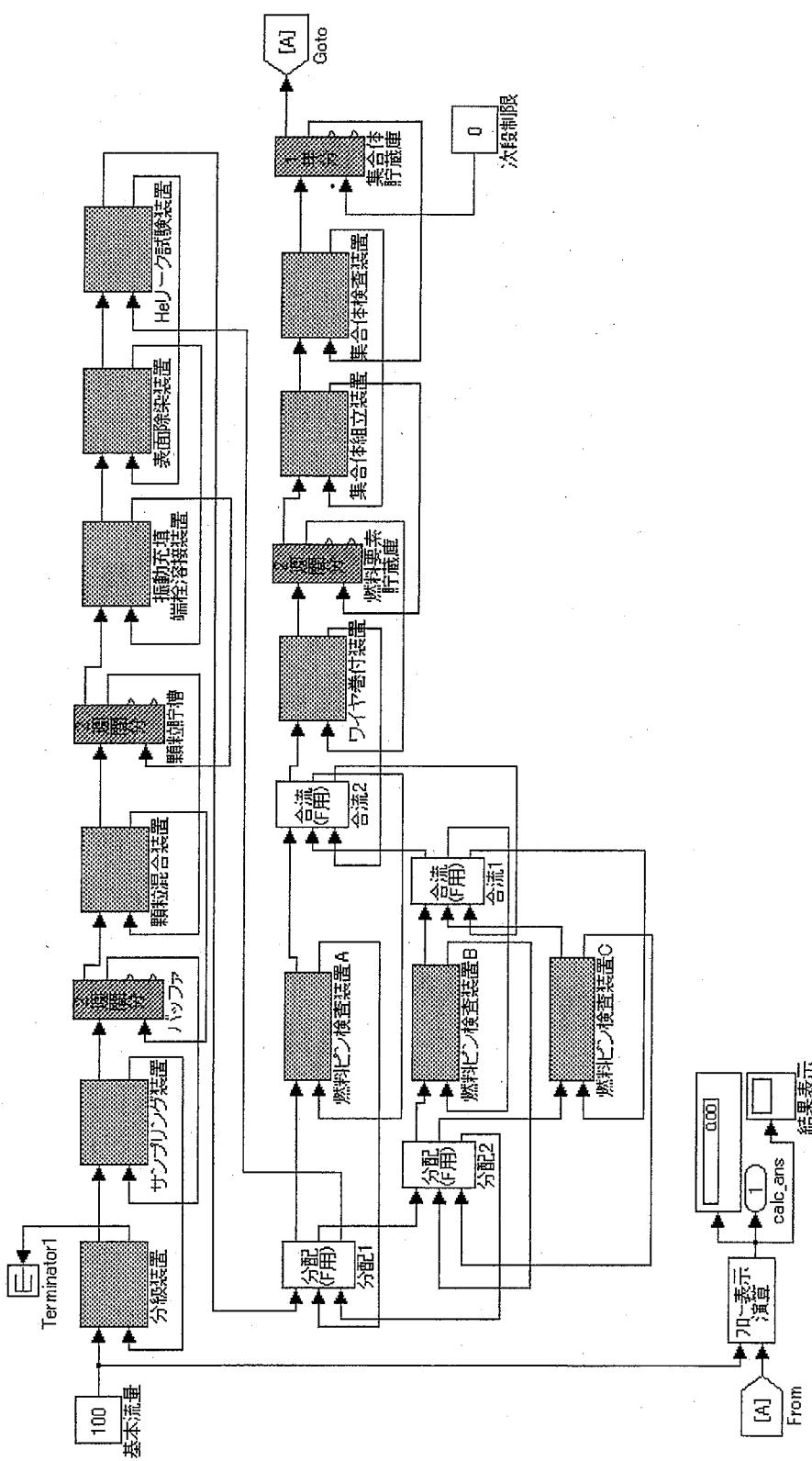


図6.1-5 乾式振動充填シミュレータフロー

各振動充填システムの顆粒製造工程におけるバッファおよび顆粒貯槽の容量に関しては、ペレットシステムの容量と異なるが、プラント設計側の配慮を重視して、湿式ゲル化で 7 日分、乾式で 2 週間分を設定した。燃料要素および燃料集合体の貯蔵容量はペレットシステムと横並びをはかった。また、バッファ蓄積時の機器処理能力についてもペレットと同じ通常時の 1.2 倍とした。

また、各システムを構成する機器単位の稼働率を、表 6.1-1 および表 6.1-2 に示した。機器ごとの稼働率は、主要構成部品の故障頻度および復旧時間のデータに基づき算出しており、得られた単体機器の稼働率に対し、さらに 2.1 節で述べた運転特性による補正をペレットシステムのときと同じ条件で行った。

システム全体稼働率の試算結果は、表 6.1-1 および表 6.1-2 の欄外に示したとおり、それぞれ 90.6、99.4% であった。ペレット、ゲル化振動充填、乾式振動充填の 3 システムのシステム全体稼働率を表 6.1-3 にまとめた。

表6.1-1 湿式ゲル化振動充填機器単体稼働率

機器		稼働率	復旧時間 (MTTR)	故障頻度 (MTBF)	稼働率 (運転特性補正 後)	備考
1	顆粒 製造	クレーン型・ハンドリング	92.2	1	0.99662	稼働率92.2%は昨年度の検討「 ゲル化プロセス機器構造の調 査 JNC ZJ9420 2002-004」 にて算出された値
2		乾燥ゲル球貯槽				
3		乾燥装置				
4		還元球貯槽				
5		還元炉				
6		計量供給装置				
7		計量供給装置2				
8		洗浄装置				
9		滴下、熟成槽				
10		滴下液供給槽				
11		滴下液混合槽				
12		焙焼球貯蔵槽				
13		焙焼炉				
14	予焼炉	99.8	1	500.00	0.99775	低除染ペレットベースにウォーキング ビームであることを考慮し稼働 率を設定した
15	焼結炉	99.8	1	500.00	0.99775	
16	冷却装置	99.8	1	500.00	0.99775	
17	燃料粒子受入装置	99.88	1	832.33	0.99865	
18	振動充填装置	99.6	1	249.00	0.99549	
19	スペーサ挿入装置a	99.83	1	587.24	0.99809	
20	端栓溶接装置	99.76	1	415.67	0.99730	
21	密度測定装置	99.54	1	216.39	0.99481	
22	除染装置	99.73	1	369.37	0.99696	
23	Heリーケ試験装置	99.91	1	1110.11	0.99899	
24	端栓溶接部検査装置	99.95	1	1999.00	0.99944	
25	ワイヤ巻付装置	99.88	1	832.33	0.99865	
26	集合体組立装置	99.85	1	665.67	0.99831	
27	集合体検査装置	99.91	1	1110.11	0.99899	

稼働率計算結果=90. 6%

表 6.1-2 乾式振動充填機器 単体稼働率

機器	稼働率 (MTTR)	復旧時間 (MTBF)	故障頻度	稼働率(運転 特性補正後)	備考
分級装置	99.86	1	727.97	99.85	振動モータ、振動フィーダ、ボールネジ等部品数約 16 点
サンプリング装置	99.62	1	264.50	99.58	モータ、減速機、空圧電磁弁等部品数約 10 点
顆粒混合装置	99.93	1	1456.75	99.92	モータ、減速機、軸受等部品数約 10 点
振動充填・端栓溶接装置	99.24	1	130.75	99.15	モータ、減速機、ボールネジ等部品数約 25 点
表面除染装置	99.73	1	369.37	99.70	湿式ゲル化と同等とした
He リーク試験装置	99.91	1	1110.11	99.90	湿式ゲル化と同等とした
燃料ピン検査装置	99.94	1	1602.51	99.93	サーボモータ、減速機、空圧電磁弁等部品数約 10 点
ワイヤ巻付け装置	99.88	1	832.33	99.87	湿式ゲル化と同等とした
集合体組立装置	99.85	1	665.67	99.83	湿式ゲル化と同等とした
集合体検査装置	99.91	1	1110.11	99.90	湿式ゲル化と同等とした

注記: 定期交換間隔は MTBF(故障するまでの運転時間)と同じ間隔とし、 σ は 500 とした。

稼働率計算結果 = 99.4%

表 6.1-3 各燃料製造システムの稼働率の比較

システム名	ペレット	ゲル化振動充填	乾式振動充填
システム全体稼働率	79.8%*	90.6%	99.4%

ペレットシステムの 79.8%*は、脱硝転換工程の 80.31%（昨年度の検討結果）を用いて低い結果となっている。今後の見直しにより高稼働率が得られる可能性が高い。

6. 2 システム稼働率の比較

各燃料製造システムの設計条件および入力データの基準等が十分にそろっていれば、試算された稼働率はシステム安定性に関する指標となり、表 6.1-3において稼働率の高いシステムほどトラブル停止が少なく安定性の高いシステムであると考えることができる。従って、試算結果を精度の高いものとすれば、乾式振動充填、ゲル化振動充填、ペレットの順に安定度が高いという結論となる。

仮にプロセス自体の安定性に差がなく、各工程機器の構成部品が類似しているとすれば、システムの工程数あるいは機器数の違いが稼働率の差になって表れると考えられるので、「低除染ペレット燃料製造ライン構成の調査」（三菱マテリアル株式会社）⁽²⁾の検討結果と、図 6.1-3、図 6.1-4（湿式ゲル化振動充填）および図 6.1-5（乾式振動充填）の比較より、乾式振動充填の工程数が最も少なく高稼働率となり、湿式ゲル化振動充填の工程数が最も多く低稼働率となると考えられる。乾式振動充填システムの稼働率が最も高くなる結果はこの仮定と一致するが、ペレットと湿式ゲル化振動充填システムの稼働率は逆転している。逆転の原因の一部はシステム間の設計条件、入力データの取得・設定状況、入力データ基準の相違の可能性があるが、最大の原因是脱硝転換工程の稼働率が 80.31%と低い上に、前段にバッファの設定が困難であることによると考えられる。脱硝転換工程の 80.31%に関しては、前節で記述したとおり今後の見直しにより高い数字になる可能性が高い。

本試算結果のように、個々の工程単位や機器単位の稼働率が高い場合、前段にバッファを設置することが可能であり、かつ機器処理能力に多少の余裕を与えることができれば、基本的にシステム全体稼働率の低下を避けることが可能と考えられる。従って、表 6.1-3 の稼働率の高低は、適所へのバッファ設置の可能性、工程機器の能力に処理量に対して余裕を持たせることの可能性を示しており、ある程度定量的なシステム特性、安定性を示していると言うことができる。

なお、次節で述べるが、システム間の設計条件、入力データの取得・設定状況、入力データの基準に様々な相違があり、十分な統一がとれていないことに留意する必要がある。

6. 3 システム特性比較上の課題

本調査で比較したシステム間には、システムの設計条件、入力データの取得・設定状況、入力データの基準について相違があることは前節で述べたが、これらの相違点を表 6.3-1 から表 6.3-3 にまとめた。

表 6.3-1 システム設計条件の比較（内側炉心燃料製造）

設計条件	ペレットシステム	湿式グル化振動充填システム	乾式振動充填システム	備考
プラント全体年間処理量	200tHM	200tHM	50tHM	湿式グル化は内側炉心用の 大粒径粒子の場合で比較
内側炉心燃料の年間処理量	41tHM	41tHM (大粒径 29tHM)	10tHM	
燃料ミート加工工程の ライン数	2 系列	以下を除き 1 系列 滴下熟成、洗浄、乾燥、焙焼： 3 系列	MOX 共通：1 系列	
燃料要素加工工程の ライン数	以下を除き 1 系列 燃料要素検査：2 系列 ワイヤ巻付：3 系列	以下を除き 1 系列 燃料粒子受入、密度測定、除 染、He リーク試験以降：1 系列 (OC, RB 共通)	振動充填、表面除染：1 系列 He リーク試験以降：1 系列 (OC, RB 共通)	
燃料集合体加工工程の ライン数	1 系列 (OC 共通)	1 系列 (OC 共通)	1 系列 (OC, RB 共通)	

表 6.3-2 積動率計算用入力データの取得・設定状況の比較

工程	入力データの取得・バッファ設定状況			備考
	ペレットシステム	湿式グリル化振動充填システム	乾式振動充填システム	
溶液受入	受入槽 ○	混合槽・供給槽 ○	—	—
燃料ミート加工	脱硝転換装置 ○	滴下熟成槽 ○	分級装置 ○	○：機器設計に基づく
バッファ	6日分 ○	洗浄装置 乾燥装置 ○	バッファ サンプリング装置 ○	△：経験等による推測
成形プレス	—	バッファ ○	サンプリング装置 ○	×
ペレット整列装置	○	バッファ ○	1週分 顆粒混合装置 ○	×：データ未取得
バッファ	6日分 ○	ハンドリング装置 ○	—	乾式振動充填法には、溶
焼結炉	—	計量供給装置 ○	—	液受入工程は不要
バッファ	6日分 ○	焙燒炉 ○	—	—
研削装置	○	バッファ ○	1週分 —	燃料ミート加工および貯
バッファ	6日分 ○	計量供給装置 ○	—	蔵工程のバッファ容量に
ペレット検査装置	○	還元炉 ○	—	は、各システムの設計値
		バッファ ○	1週分 —	を使用（設計側の配慮を
		計量供給装置 ○	—	重視）
		焼結炉 ○	—	—
燃料ミート貯蔵	ペレット貯蔵庫 1月分	顆粒貯槽 ○	顆粒貯槽 2週分	—
燃料要素加工	スタック調整装置 ○	燃料粒子受入装置 ○	(燃料粒子受入装置) 振動充填装置 ○	○：燃料要素および燃料集合
	燃料要素組立 ○	振動充填装置 ○	振動充填装置 ○	体の貯蔵庫の容量は、2週
	—	—	スペーサ挿入装置 (スペーサ挿入装置) ○	分、1年分に統一
	(端栓溶接装置) ○	端栓溶接装置 ○	端栓溶接装置 (端栓溶接装置) ○	燃料要素組立検査工程の
	—	—	密度測定装置 ○	スペーサ挿入、密度測定
(除染装置)	○	除染装置 ○	除染装置 ○	の各装置は、ペレット法
			（スペーサ挿入装置） ○	には不要
			（端栓溶接装置） ○	—
燃料要素検査装置	△	端栓溶接検査装置 ○	燃料要素検査装置 ○	（ ）内の装置は他装置
(リーグ試験装置)	△	リーグ試験装置 ○	リーグ試験装置 ○	に機能が含まれる
ワイヤ巻付装置	△	ワイヤ巻付装置 ○	ワイヤ巻付装置 ○	—
燃料要素貯蔵	燃料要素貯蔵庫 2週分	燃料要素貯蔵庫 2週分	燃料要素貯蔵庫 2週分	（ ）内の装置は他装置
燃料集合体加工	燃料集合体組立装置 △	燃料集合体組立装置 ○	燃料集合体組立装置 ○	に機能が含まれる
燃料集合体検査装置	△	燃料集合体検査装置 ○	燃料集合体検査装置 ○	—
燃料集合体貯蔵	燃料集合体貯蔵庫 1年分	燃料集合体貯蔵庫 1年分	燃料集合体貯蔵庫 1年分	—

表 6.3-3 稼働率計算用入力データの基準比較

比較項目 データの 入力単位 および計算方法	ペレットシステム 機器構成ユニット単位	湿式ケル化振動充填システム 機器構成部品単位	乾式振動充填システム 機器構成部品単位	備考
入力データ および計算方法	ユニット単位の保守・交換頻度*のMTBFへの換算入力を 行い、保守・交換時間(MTTR)に1日要するものとして、ユニット単位の稼働率を計算。	故障が想定される機器構成部品毎に故障頻度**、復旧時間とMTTRとして1日を要するものとし、部品単位の稼働率を計算。さらに、運転特性補正を含むシミュレータ計算のために便宜的にMTTRを1日と設定し機器単位のMTBFに再換算し入力。	故障が想定される機器構成部品**毎に故障頻度を設定しMTBFに換算、復旧時間とMTTRとして1日を要するものとし、部品単位の稼働率を計算。さらに、これらのがけ合わせにより機器単位の稼働率を計算。	保守・交換頻度*は、JNC 技術資料(2)の表 5.2-2 を根拠とする設定。 故障頻度**は、JNC 技術資料(3)の付表 I を根拠とする設定。 機器構成部品***は、JNC 技術資料(9)(10)の機器図や仕様表等をもとに必要な機能を考慮して設定。 (故障頻度に関する議論の機器故障率の算出(2001)等を参考)
入力データの例 (同等工程機器の比較)	<燃料要素組立装置> 被覆管供給装置 ペレット押込装置 ウォーキングブリーム スプリング押込装置 端栓溶接装置 形状測定外径研削装置 全長除染装置 搬送装置	<振動充填装置> マガジン移送装置 ・モータ ・シリンド ・ギアボックス ・ベアリング ・回転ジョイント ・バッキン ・燃料供給部昇降装置 (マガジン移送装置と同様) 定量供給装置 (マガジン移送装置と同様) 燃料供給部回転機構 (マガジン移送装置と同様) 加振装置 (マガジン移送装置と同様)	<振動充填・端栓溶接装置> 回/時間 4.5×10 ⁻⁶ 0.1×10 ⁻⁷ 6.3×10 ⁻⁷ 6.5×10 ⁻⁷ 7.5×10 ⁻⁶ 0.2×10 ⁻⁷ ・モーター ・減速機 ・直動ガイド ・ボールねじ ・圧空シンダ ・圧空電磁弁 ・フロコンバルブ ・軸受 ・カッティング ・タイミングベルト ・スプリング ・ウォームユニット ・モータコントローラ ・溶接電源 ・スリップリング ・ロードセル ・リニアセンサ ・アンプ ・ファイバースコープ ・振動発生器 ほか	同等工程と考えられるペレット法の燃料要素組立装置と振動充填法の振動充填装置の比較。

(1) システム設計条件

稼働率に影響を与えるシステム設計条件として、以下に述べる理由から年間処理量、構成ラインが考えられる。これらの条件は表 6.3-1 のとおりに異なっている。

年間処理量が 200tHM の場合、燃料種類ごとに専用製造ラインが設置される傾向があるが、年間処理量が小さくなると、異種の燃料を同一ラインで製造することになる。本章における比較では内側炉心燃料製造について稼働率計算を行ったが、異種燃料ライン同士の離合集散により他種の燃料製造の影響を受けている可能性がある。本影響は、各機器の必要処理能力に対する最大処理能力の余裕のとり方と関連するため一概には言えないが、合流が多くなる年間処理量の小さいシステム、即ち乾式振動充填システムで、比較的他種の燃料製造の影響を受け易くなっていると考えられ、同システムの稼働率試算結果の取り扱いに留意が必要と考える。

なお、最大処理量の余裕については、稼働率の試算では一律 1.2 倍の処理能力の余裕を持たせるものと設定した。

今後の課題としては、異種燃料の製造ラインとの分岐、合流の稼働率への影響を明確にすることがあげられ、影響が顕著であれば異種燃料まで含めてシミュレーションを行うことが好ましいと考えられる。

(2) 入力データの取得・設定状況

稼働率に関連する入力データの取得状況、バッファの設定状況についても、表 6.3-2 のとおり相違点がある。

入力データの取得状況に関しては、湿式ゲル化振動充填システムで全工程（機器）についてデータが取得されているが、ペレットシステムでは燃料要素検査装置以降の機器設計（入力データ取得上不可欠である）が今後の課題となっているため、フェーズ I の成果、経験に基づく推測データを仮に入力している。また、乾式振動充填システムでは除染装置以降のデータが得られていないため、湿式ゲル化振動充填のデータを転用している。従って、今後これらの不足データを取得する必要がある。

バッファの設定状況に関しては、燃料要素および燃料集合体の貯蔵庫について 3 システムの横並びがとれたものの、燃料ミート加工工程のバッファ、燃料ミート貯蔵では、個々の設計に基づいた個別の設置個所、容量が設定してある。バッファの設置個所、容量について、ペレットおよび湿式ゲル化振動充填システムでは本シミュレータを用いたパラメータ検討を実施しており^{(7),(8)}、例えばバッファ容量に差はあるものの検討レベルから判断すると、ある程度横並びがとれていると考えることができる。しかし、乾式振動充填システムではパラメータ検討が実施されておらず、今後の課題である。

(3) 入力データの基準

稼働率に関連する入力データの基準についても、表 6.3-3 のとおり 3 つのシステム間でデ

ータ入力単位を含めて違いがある。データ入力の単位を比較すると、ペレットシステムがユニット単位であり、他は機器を構成する部品単位である。

また、入力データは、ペレットシステムの場合保守・交換頻度（平均修復時間 MTBF で入力）および平均補修時間（MTTR、ユニット交換時間として一律 1 日を与えた）である。これに対して、湿式ゲル化システムでは、想定される故障部品ごとの故障頻度、復旧時間であり、すべての部品の年間停止時間を集計して機器単位の稼働率を計算している。乾式振動充填システムの場合も想定される故障部品ごとの故障頻度が入力データであり、平均修復時間を設定して部品ごとの稼働率を計算し、これらの掛け合わせにより機器の稼働率計算を行っている。振動充填システムでは、シミュレータを用いるために便宜的に MTTR をペレットと共に 1 日と設定し故障頻度を MTBF に換算して計算した。

この他、振動充填システム間の違いは、想定される故障部品のブレークの程度および故障頻度の設定根拠であり、類似装置である振動充填～端栓溶接装置を比較すると、乾式で 25 点の部品（表 6.1-2 参照）に、湿式ゲル化で 100 点を超える部品にブレークされている。故障頻度の設定に関しては、原子力発電所における機器故障率の解析結果を参考にしている部分、設計者のノウハウ等で設定している部分があり、データの基準は一致していない。

このようにデータ入力の単位、入力データの設定基準が異なっており一貫性が得られていない。

また、表 6.3-4 にペレットシステムの燃料要素組立装置（端栓溶接装置、除染装置を含む）、湿式ゲル化振動充填システムの振動充填装置＋スペーサ挿入装置＋端栓溶接装置、乾式振動充填システムの振動充填・端栓溶接装置＋除染装置について工程稼働率を示した。これらの装置は同等工程の装置であり、いずれも機能的に同じと考えることができる。ペレットの燃料要素組立装置には構成ユニットが 9 つあり、これを直列に接続することによって工程稼働率 98.2%（99.8% の 9 乗、「低除染ペレット燃料製造ライン構成の調査」（三菱マテリアル株式会社）⁽²⁾の図 5.2-1 参照）が得られる。一方、湿式ゲル化振動充填の振動充填装置については、スペーサ挿入装置、端栓溶接装置、除染装置を直列に接続することによって工程稼働率 98.8%（99.55% × 99.81% × 99.73% × 99.7%、表 6.2-1 参照）が得られる。乾式振動充填の振動充填・端栓溶接装置についても、除染装置を直列に接続することで 98.8%（99.1% × 99.7%、表 6.2-2 参照）が得られる。

表 6.3-4 工程稼働率の試算結果の比較（燃料要素組立または振動充填の例）

システム名	ペレット	湿式ゲル化振動充填	乾式振動充填
比較機器の名称	燃料要素組立装置 (端栓溶接装置、 除染装置を含む)	振動充填装置、 スペーサ挿入装置、 端栓溶接装置、 除染装置	振動充填・端栓溶接 装置、 除染装置
機器稼働率試算結果	98.2%	98.8%	98.8%

全般的に 98%以上の高い稼働率となっており、ユニット単位で計算を行った燃料要素組立装置の稼働率がやや低く、構成部品のブレークが細かい振動充填装置が同じ高い値となっている。

結論としては、入力データの基準に差があっても、大きな差にはなり難いといえる。ただし、工程単位、機器単位の高稼働率が示すように、全システムに共通して、予防保全を含む保守が行われていることを前提とした入力データ（故障頻度等）であることが推測される。予防保全、保守に関しては、プラントの計画停止期間に集中して実施できるのか、あるいは、運転期間内に一部を行う必要があるのか見極めが必要である。特に振動充填システムに関しては機器全般に著しく稼働率が高くなっていること、運転期間内に行う必要がある保守（故障に分類されなかったもの）が稼働率に反映されていない可能性がある。

従って、全体的に予防保全や保守の実施方法を加味した上で、必要に応じて入力データを補正し、シミュレーションに反映して行くことが今後の課題となる。

7. 特性評価手法の改良

昨年度実施・製作した特性シミュレータのハンドリング性を高めるため、データ入力方法について検討した。

その結果、MATLAB システムには excel で作成したデータベースとリンクする EXCEL LINK というアプリケーションソフトが市販されており、今回、シミュレータに組み込むことにより対応を行った。

プラント特性シミュレータの操作マニュアルについて参考資料に示す。

8. まとめ

1999 年度に開始した FBR サイクル実用化戦略調査研究は、2001 年度からフェーズⅡの段階となり、2001 年度は先進湿式再処理溶液を原料とした低除染ペレット燃料製造プラント等のプラント設計の信頼性向上を目的として稼働率や経済性を評価する上で必要となるプラント特性シミュレータの基本開発を行い、容易にかつ柔軟に任意のユニット同士を接続でき、プラントの稼働率の計算が簡便に対応できることおよびプラントの稼働率向上のための方策とその効果についてシミュレーションできることを確認した。

本年度は、FBR サイクル実用化戦略調査研究のフェーズⅡの 2 年度として、低除染湿式ペレット法に対する機器の運転特性、機器交換頻度を考慮した稼働率を検討するとともに、同シミュレータを他の燃料製造システムに適用することで、製造システム間の稼働率の比較検討を行い、下記の成果を得た。

- (1) 機器の運転特性による機器稼働率の設定方針を整理するとともに、稼働率を向上できるバッファ容量、機器処理能力、台数に関する最適化を行った。
- (2) 部品を定期交換するケースと故障時に部品を交換するケースに対応できる廃棄物発生量算出プログラムを作成した。
- (3) 同シミュレータを他の燃料製造システムに適用し、製造システム間の特性比較の考え方を整理し、稼働率の比較検討を行った。
- (4) 昨年度作成した特性評価シミュレータのデータ入力方法について、より簡便な方法を検討し、シミュレータに組み込んだ。

2003 年度は、バッファの設置や定期交換による稼働率向上というプラス側効果と建設コストや廃棄物発生量増加というマイナス側効果の相関をシミュレータにより関連付けるなど、経済的にプラント評価をより適正に評価できるプログラムを追加することが望まれる。また、システム間の特性比較として入力データの充実、廃棄物発生量による環境負荷低減性の比較が課題である。

9. 参考文献

- 1) 森塚秀人、”ガスタービン保守最適化支援プログラムの開発－第一報 主要部品の保守管理基本プログラム”、電力中央研究所報告 W98020 (1999)
- 2) 半沢正利、吉村忠宏ほか、“低除染ペレット燃料製造ライン構成の調査”、
JNC TJ9420-2003-003 (2003)
- 3) 朝田泰英、原子力政策について～高経年化対策について～”、第 15 回エネルギー政策検討会、ホテルサンルートプラザ福島、2002 年 3 月、会議議事録（要約）(2002)
- 4) 塩見 弘、“信頼性工学入門 改訂三版”丸善株式会社(2001)
- 5) 塩見 弘、佐々木正文、“信頼性演習”株式会社日科技連出版社(1994)
- 6) 坪内和夫、“設計工学シリーズ 3 信頼性設計” 丸善株式会社(1976)
- 7) 半沢正利、吉村忠宏ほか、“低除染燃料製造システム特性評価手法に関する調査”、
JNC ZJ9420 2002-002 (2002)
- 8) 梅村昭男、菊池俊明ほか、“ゲル化顆粒燃料製造ライン構成の調査”、
JNC TJ9400 2003-002 (2003)
- 9) 河野秀作、田中健哉ほか、“燃料製造システムの技術検討書”、
JNC TY9400 2000-026 (2003)
- 10) 河野秀作、田中健哉ほか、“燃料製造システムの技術検討書－実用化戦略調査研究フェーズ I 成果報告一”、JNC TY9400 2001-023 (2003)

參考資料

プラント特性シミュレータ 操作マニュアル

1. Excel とシミュレータ (MATLAB+Simulink)

- ・Excel と MATLAB (シミュレータ) は、Excel Link と呼ばれるソフトウェアアドイン (拡張機能) によって、互いのワークスペースのデータを交換することができます。表-1 にデータ交換方法の一例を示します。

2. Excel の運転・交換補正画面_Template ファイル

- ・本ファイルを開くと主に使用する稼働率補正シートおよび運転期間などの計算条件を入力する設定シートがあります。稼働率補正シートは左右方向に、ブロック定義データ画面、運転特性補正データ画面、定期交換補正データ画面の 3 面で構成されます。
- ・「右頁」ボタン、「左頁」ボタンで左右のページ単位の移動ができます。(画面の解像度が 1024×768 のときに、各画面単位で表示できるように最適化されております。Excel の左右スクロールバーの使用も可能です。)
- ・縦スクロール範囲は Excel の制限に従いますが、4 行目までは縦スクロールせず常に表示されます。

① ブロック定義データ画面

- ・「ブロック名読み込み」ボタン：シミュレータで設定された、ブロック名のみを読み込みます。データ一覧画面に未登録のブロック名を設定します。
- ・「パラメータ読み込み」ボタン：シミュレータで設定された、ブロック名とパラメータをすべて読み込みます。シミュレータで変更したパラメータがデータ一覧画面に上書きされます。
- ・「書き出し」ボタン：データ一覧画面で設定・補正されたデータ（補正後稼働率等）を、blk ファイルに書き出します。
- ・「MTBF 補正編集」ボタン：「MTBF 補正編集（運転特性・定期交換）」画面を表示します。
- ・ブロック名：シミュレータ側で作成したブロックの名前です。通常、「ブロック名読み込み」で読み込みます。Excel 側で入力する場合、シミュレータ側と同じ名称にする必要があります。なお、「書き出し」時に Excel 側に同一名称ブロックが複数あった場合エラーとなります。
- ・「VB 初期化」ボタン：このボタンを実行すると、本ファイルに含まれるプログラムが初期化状態になりますがプログラムそのものに何らかの変更を加えるものではありません。これは、設定シートの「ブロック最大行数」を変更した場合や、エラーが発生してデバッグ画面が出た後に実行する必要があるものです。
- ・種別：ブロックの種類です。パラメータを必要とするブロックは、処理ブロック、貯留（タンク）ブロック、分配ブロック、合流ブロックの 4 種類です。この中で稼働率が関係するのは、処理ブロックのみです。
- ・C 列「標準 MTBF」：カタログ等に記載されている MTBF 値を入力します。稼働率計算の基本パラメータとなります。
- ・D 列「修理時間 MTTR」：平均修理時間 (MTTR) を入力します。稼働率計算の基本パラメー

タとなります。

- ・E列「補正前稼働率」: C/(C+D)で計算された、補正前の稼働率です。シミュレータで使用される稼働率に「補正前稼働率」が選択されている場合、セルの色が水色等で表示されます。計算結果なので入力は不可です。

② 運転特性補正データ画面

- ・「運転特性全計算」ボタン: すべての行の運転特性補正後 MTBF を再計算します。(通常、セルのデータが更新されると自動的に再計算されるので実行する必要はありません。)
- ・V列「(MTBF)」: C列「標準 MTBF」のコピーです。(参考用、入力不可)
- ・W列～AD列: 運転特性補正パラメータを設定します。
- ・AE列～AH列: オプションの運転特性補正パラメータを設定します。
- ・AJ列「妥当性ランク」: 運転特性補正の妥当性(設定したパラメータの確からしさ)の参考入力用です。妥当性に応じた数値を設定し、検証作業時の参考とします。
- ・AK列「補正後 MTBF」: 運転特性補正のための計算式を定義します。計算式は、補正する対象により変更可能ですが、式の不用意な変更を防ぐため直接入力は不可です。「MTBF 補正編集(運転特性・定期交換)」画面で編集します。
- ・W列～AH列およびAJ列は直接入力も可能ですが、基本的には「MTBF 補正編集(運転特性・定期交換)」画面で編集します。
- ・AL列「(MTTR)」: D列「MTTR」のコピーです。(参考用、入力不可)
- ・AM列「補正後稼働率」: AK/(AK+AL)で計算された、補正後稼働率です。シミュレータで使用される稼働率に運転特性の「補正後稼働率」が選択されている場合、セルの色が水色等で表示されます。計算結果なので入力は不可です。
- ・AN列「(補正前稼働率)」: E列「補正前稼働率」のコピーです。(参考用、入力不可)

③ 定期交換補正データ画面

- ・「定期交換全計算」ボタン: すべての行の定期交換補正後 MTBF を再計算します。
- ・AP列「運転特性(MTBF)」: 運転特性のAK列「補正後 MTBF」のコピーです(参考用、入力不可)。正規分布する故障密度関数の場合、平均: $\mu = \text{MTTF}(\text{MTBF})$ が分布の中心となります。
- ・AQ列「定期交換間隔」: 定期交換の間隔を設定します。
- ・AR列「標準偏差: σ 」: 故障率が増加する故障密度関数は正規分布で表すことができますが、その偏りの大きさを設定します。
- ・AS列「機器重量」: 廃棄物発生量算出(廃棄物発生個数×機器重量)に用います。
- ・AU列「妥当性ランク」: 定期交換補正の妥当性(設定したパラメータの確からしさ)の参考入力用です。妥当性に応じた数値を設定し、検証作業時の参考とします。
- ・AQ列～AS列およびAU列は直接入力も可能ですが、基本的には「MTBF 補正編集(運転特性・定期交換)」画面で編集します。直接各セルに入力した場合、AV列「補正後 MTBF」が計算されないため、「定期交換全計算」ボタンにより計算する必要があります。
- ・AV列「補正後 MTBF」: 定期交換補正後の MTBF(「予防保全の行なわれたときの故障率の漸近値」を求める式を元に計算された値)が表示されます。式そのものをセルに定義することは困難であると思われる所以、プログラムにより補正值を計算し、値をセルに代入します。基本的には「MTBF 補正編集(運転特性・定期交換)」画面で計算されます。計

算結果なので入力は不可です。

- ・ AW 列「(MTTR)」：D 列「MTTR」のコピーです。（参考用、入力不可）
- ・ AX 列「補正後稼働率」：AV / (AV+AW) で計算された、補正後稼働率です。シミュレータで使用される稼働率に定期交換の「補正後稼働率」が選択されている場合、セルの色が水色等で表示されます。計算結果なので入力は不可です。
- ・ AY 列「運転特性(稼働率)」：運転特性の AM 列「補正後稼働率」のコピーです。（参考用、入力不可）
- ・ AZ 列「(補正前稼働率)」：E 列「補正前稼働率」のコピーです。（参考用、入力不可）
- ・ BA 列「運転期間廃棄物量」：設定シートで入力した運転期間に寿命および定期交換により発生する廃棄物量です。計算結果なので入力は不可です。
- ・ BB 列「2MTBF 廃棄物量」：平均寿命(MTBF)の 2 倍を運転期間とした時の寿命および定期交換により発生する廃棄物量です。計算結果なので入力は不可です。
- ・ BC 列「運転期間廃棄個数」：設定シートで入力した運転期間に寿命および定期交換により発生する廃棄物個数です。計算結果なので入力は不可です。
- ・ BD 列「2MTBF 廃棄個数」：平均寿命(MTBF)の 2 倍を運転期間とした時の寿命および定期交換により発生する廃棄物量です。計算結果なので入力は不可です。
- ・ BE 列「運転期間廃棄物量」：設定シートで入力した運転期間に寿命(定期交換なし)により発生する廃棄物量です。計算結果なので入力は不可です。
- ・ BF 列「運転期間廃棄物量」：設定シートで入力した運転期間に寿命(定期交換なし)により発生する廃棄物量です。計算結果なので入力は不可です。

3. 「MTBF 補正編集（運転特性・定期交換）」画面

- ・入力不可の項目（計算結果等）の背景色は薄い灰色で表示されます。
- ・「MTBF 補正編集（運転特性・定期交換）」画面が表示されている状態でも、Excel 側の画面（ワークシート）の操作は可能です。ただし、現在編集中の行は入力不可です。
- ・「登録」ボタン：編集されたデータを、データ一覧画面に設定します。画面は「MTBF 補正編集（運転特性・定期交換）」画面のままです。
- ・「キャンセル」ボタン：編集されたデータを破棄し、編集前のデータ（データ一覧画面のデータ）に戻します。画面は「MTBF 補正編集（運転特性・定期交換）」画面のままです。
- ・「閉じる」ボタン：データ一覧画面に戻ります。（データが変更されている場合、データの「登録確認メッセージ（登録・キャンセル）」が表示されます。）
- ・上下に 2 個の三角マーク（▲および▼）が並んだボタン（スピンドルボタン）は、いずれかの三角マークをクリックすると、そのボタンの右側にあるボックスの数値が加算または減算されます。（▲をクリックすると加算、▼をクリックすると減算されます。）
- ・▼が 1 個のボックス（コンボボックス）は、三角マークをクリックすると、ボックスの下側にボックスに設定可能な数値のリスト（0.01, 0.1, 1, 10 等）が表示されます。
- ・「使用する稼働率」にあるオプションボタン（○）をクリックすることにより、シミュレータで使用する稼働率を、補正前稼働率、運転特性補正後稼働率、定期交換補正後稼働率から選択できます。（選択された稼働率の○に、・が表示されます）
- ・「運転特性補正計算式（補正後 MTBF）」の計算式は「+ - × ÷ ()」ボタンと、各パラメータの左にある小さなボタンで式を入力・編集します。
- ・「運転特性補正計算式（補正後 MTBF）」の「MIN」ボタン（「MIN」関数）および「,」ボタン（比較する式の区切り文字）は、式の結果の小さいほうを選択するための機能です。（例：寿命の短い方を補正後 MTBF 値として採用する場合など。）
- ・「運転特性補正計算式（補正後 MTBF）」の「コメント」（備考）：主に運転特性補正のための計算式に対するコメントを入力します。（特に入力に制限はありません）
- ・「運転特性補正計算式（補正後 MTBF）」の「式参照」ボタン：「「運転特性補正計算式」の参照と登録」画面を表示します。

4. 「運転特性補正計算式」の参照と登録 画面

- ・おもに登録済みの計算式を参照する画面です。
- ・運転特性補正計算式の編集

計算式：おもに計算式の確認を行います。計算式の編集も可能です。

コメント：計算式の対象となるブロックや式の特長などのコメント（備考）を入力します。

キャンセルボタン：すべての入力を無効とし、初期状態（画面が開かれたときの状態）に戻します。

閉じるボタン：変更（編集）された計算式を、「MTBF 補正編集（運転特性・定期交換）」画面の運転特性補正計算式（補正後 MTBF）に代入し、この画面を閉じます。

- ・登録済み計算式およびコメントの参照と選択（ファイル）

登録済みの計算式（左側ウインドウ）とコメント（右側ウインドウ）が表示されます。

設定したい計算式をマウスでクリックして選択します。

ウインドウの中に式またはコメントが表示しきれない場合、それぞれのスクロールバーによりスクロールして表示させることができます。

- ・編集と登録

選択編集ボタン：「登録済み計算式およびコメントの参照と選択」ウインドウで選択した計算式が、「運転特性補正計算式の編集」の計算式のウインドウにコピーされます。

選択削除ボタン：「登録済み計算式およびコメントの参照と選択」ウインドウで選択した計算式が、登録ファイルから削除されます。

新規登録ボタン：「運転特性補正計算式の編集」の「計算式：」および「コメント：」の内容が、新規計算式およびコメントとして登録ファイルに保存されます。（上書き保存の機能はないので、新規登録を行なった後、不要になった登録済み計算式を削除します）。

- ・K列「空時吐出量制限」：貯留（タンク）ブロックの後段の処理ブロックの処理能力が、タンクの流入量と等しいか大きい場合は、inf（無限大）を設定しておけば、従来と同様にタンクが空のときの流入量が、そのまま吐出量となります。（後段の処理ブロックの最大処理能力を設定しておいてもかまいませんが、基本流量を変化させる都度、設定を見直す必要があります。）項目を追加しました。（）
- ・分配ブロックの「最大処理能力比」を「上側処理能力比」と「下側処理能力比」に変更しました。（O列およびP列）
- ・合流ブロックおよび「最大処理能力」の項目を追加しました。（R列）

Microsoft Excel - 連転・交換補正面Template.xls

ブロック定義データ画面

出しき吉

卷之三

1

卷之三

運転特性補正西面 Template.xls											
モデル名:		運転特性補正パラメータ									
	ブロック名	標準(MTIE)	作動回数	作動回数補正係数	ピーコク	燃費	透明度	湿度	負荷	補正係数	運転特性補正計算
4.1	モーター試験装置	2.0	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	0.99	運転特性補正計算
4.2	サンプリング装置	2.0003	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	0.99	運転特性補正計算
4.3	ロイド修正装置	3	1	1.00	1.00	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.4	全体体積監査装置	4	1	1.00	1.00	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.5	全会体組立監査	4.9998	1	1.00	1.00	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.6	振動防護装置	4	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.7	端子接続装置	7	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.8	燃料比-燃焼監査A	8.0009	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.9	燃料比-燃焼監査B	9	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.10	燃料比-燃焼監査C	10.0011	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.11	毛細管監査装置	11.0048	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.12	分離監査装置	12.0199	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.13	燃料混合監査装置	13.0236	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.14	ハッファ*	14.0273	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.15	集合体*	15.0310	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.16	計量監査	16.0347	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.17	燃料率表*	17.0384	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.18	計量監査	18.0421	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.19	分配	19.0458	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.20	分配	20.0495	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.21	分配	21.0532	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.22	分配	22.0569	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.23	合流	23.0606	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.24	合流	24.0643	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.25	合流	25.0680	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.26	合流	26.0717	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.27	合流	27.0754	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.28	合流	28.0791	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.29	合流	29.0828	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算
4.30	合流	30.0865	1	1.00	0.99	0.99	1	1	1	1.00	運転特性補正計算

Microsoft Excel - 調査・交換・簡正面 Template

MTBF補正結果(運転持性・定期交換)		MTBF補正結果(運転持性・定期交換)	
番号	5	試験装置	MTBF補正結果(運転持性・定期交換)
参考		登録	閉じる
処理プロセス		重転持性補正計算式(補正後MTBF)	処理(MTTR=1)
		$=Cn \cdot (Wn^*Xn) - (Yn^*Zn \cdot Yn) * AA_n * AB_n * AC_n * AD_n$	
C:標準MTBF(オフタログ直等)	20	X:作動回数	10
D:MTTR(平均修理時間)	1	Y:ピーコク運転時間	1
E:補正前稼働率 C/(C+D)	0.9524	Z:ピーコク運転時間補正係数	1
W:作動回数補正係数	1	AA:放射線補正係数	0.9
X:作動回数補正係数	10	AB:雰囲気補正係数	0.99
Y:ピーコク運転時間	10	AC:温度補正係数	1
Z:ピーコク運転時間補正係数	1.03	AD:負荷補正係数	1
AA:放射線補正係数	0.01	AE:オプションセル列1	0.01
AB:雰囲気補正係数	0.01	AF:オプションセル列2	0.01
AC:温度補正係数	0.01	AG:オプションセル列3	0.01
AD:負荷補正係数	0.01	AH:オプションセル列4	0.01
AE:オプションセル列1	0.01		
AF:オプションセル列2	0.01		
AG:オプションセル列3	0.01		
AH:オプションセル列4	0.01		
使用する稼働率		定期交換補正	定期交換補正
補正前稼働率		運転持性補正	運転持性補正
		運転期間廃棄物量	2754.8 (期間=1000)
		2×MTBF時廃棄物量	92.276
重転持性補正計算式(補正後MTBF)			
$=Cn \cdot (Wn^*Xn) - (Yn^*Zn \cdot Yn) * AA_n * AB_n * AC_n * AD_n$			
コメット:		式参照	
AJ:妥当性ランク		16 662	
運転持性補正後MTBF		0.9434	
運転持性補正後稼働率			
定期交換補正			
AU:妥当性ランク		10	
AQ:定期交換間隔		1	
AR:標準偏差:σ(運転整定の正確)		50	
定期交換補正後MTBF		1.6522	
定期交換補正後稼働率		0.6230	
AS:交換時廃棄物発生量		2	
運転期間廃棄物量			
2×MTBF時廃棄物量			

表-1 Excel ⇔ シミュレータ(Matlab)間のデータ交換の例

	Excel側操作	Matlab側操作	備考
①	—	Matlabを起動してロックフローを作成し実行することによりC:\#MATLAB6p1\workフォルダ内にmbkファイルが作成されロックフロー内のデータが書き込まれる。	*:拡張子がmbkのテキスト形式ファイル
②	Excelの運転・交換補正ファイルを開く(マクロを有効にして開く)	—	
③	ロック定義データ画面内の「ロック名読み込み」ボタンを押すことにより。①で作成されたmbkファイルよりロック名称を読み込む	—	
④	ロック定義データ画面内の「パラメータ読み込み」ボタンを押すことにより。①で作成されたmbkファイルよりロックパラメータを読み込む*	—	通常はパラメータの入力はExcel側より行うものと考えられる。
⑤	ロック定義データ画面内の下記項目をセルに入力する。(MTBF・MTTR)	—	
⑥	運転特性補正データ画面画面内の下記項目をセルに入力する(作動回数・作動回数補正係数・ピーク運転時間・ピーク補正係数・放射線補正係数・零圧気補正係数・温度補正係数・負荷補正係数)	—	
⑦	定期交換補正データ画面画面内の下記項目をセルに入力する。(定期交換間隔・標準偏差・機器重量)	—	
⑧	データ一覧画面内の「運転特性全計算」ボタンおよび「定期交換全計算」ボタンを押して最終的な各ロックの稼働率を算出する。	—	*:拡張子がblkのテキスト形式ファイル
⑨	データ一覧画面内の「書き出し」ボタンを押すことによりC:\#MATLAB6p1\workフォルダ内にblkファイルが作成され⑥で算出した稼働率が書き込まれる。	—	「オープン」ボタンを押すと、Excelで編集したデータの読み込み確認のダイアログボックスが表示されるので[OK]を押す。
⑩	—	—	
⑪	完了	—	