

## タスク分析に基づくインタフェース高度化手法の 実験用加速器への応用

### 第一報：タスク分析によるインタフェースの必要条件の抽出

#### Application of task analysis method for MMI improvement to experimental accelerator facility

○倉持嘉徳, 高橋信, 松山成男, 藤沢正則, 北村正晴

○Kuramochi Yoshinori, Takahashi Makoto, Matsuyama Shigeo,  
Fujisawa Masanori, Kitamura Masaharu

東北大学

Touhoku University

キーワード：タスク分析(task analysis), マンマシンインタフェース(man-machine interface),  
実験用加速器(experimental accelerator)

連絡先：〒980-8571 宮城県仙台市青葉区字青葉01 東北大学 工学部 量子エネルギー工学科  
核エネルギーシステム安全工学講座 北村研究室 倉持嘉徳  
Tel&Fax:022(217)7907, E-mail:mochi@luke.qse.tohoku.ac.jp

### 1. 背景

大規模機械システムの運転においては、機械と人間の界面となるインタフェースが重要な役割を果たす。システムの安全かつ効率的な運転のためには、運転員が的確にシステムの状況を把握して、的確な操作が行えるようなインタフェースが望ましい。本研究で対象とする実験用の加速器は、多くのシステムが複雑に干渉し合う典型的な複雑システムであるが、実験用システムであるという制約条件から、必要最低限のインタフェースが準備されているに過ぎない。長年の運転経験を持つ熟練者は、このような必要最小限のインタフェースでも運転操作を行うことができるが、初心者が運転操作を覚えるためには、最低限でも1, 2年の修行が必要であると言われている。対象としているシステムには専属のオペレータはおらず、ユーザ自身が運転する形態をとっている。そのユーザの多くは学生であり、運転自体が目的ではないために、できるだけビーム発生にかかる労力・時間は削減したいという要求がある。

対象とした加速器のシステムに関しては後で詳しく説明するが、基本的にはイオンを高圧電場で加速させ、偏向磁界で方向を変えろというシステムであり、モデルとしては不確定要素はそれほど多くはない。しかしながら、実際の運転において要求されるビームを発生させるのは決して簡単なことではないことは事実である。

本研究では、最終的には必ずしも熟練者でなくても要求されるビームを発生させることが可能な知的インタフェースの実現を目的としている。研究の第一段階として、熟練運転員の運転の様子の詳細な観察を通じて、運転操作の内容に関するタスク分析を行った。それは、この制御操作のタスク分析を通じて、運転操作において何が難しいのか、熟練者はどのような情報を見て操作しているのか、ビーム発生までの操作はどのような過程で行っているのかという点に関する情報を収集するためである。本報告ではこのタスク分析の結果、及びそれに基づくインタフェースの要件について述べる。

## 2. 対象システムのインタフェースの現状

本研究は高速中性子実験室(Fast Neutron Laboratory:以下FNL)を対象として行った。

### 2. 1 実験用加速器システムの概要

FNLは最高電圧4.5MVのダイナミトロン加速器を備えており、中性子実験やイオンビーム照射実験に活用されている。

加速されるイオンは、デュオプラズマトロン型イオン源のプラズマチャンバで生成され引き出される。引き出されたイオンビームはレンズ系で収束され、質量分析されたのちに加速管へと導かれる。

加速管で加速されたイオンは、ビーム輸送系により各実験用Portへと導かれ、様々な実験に用いられる。図1にFNLの平面図を示す。また、この加速器の仕様は以下の通りである。

#### 4.5MVダイナミトロン加速器仕様

##### (1) Schenkel型電圧発生装置

電圧範囲 : 0.7-4.5MV  
絶縁ガス : SF<sub>6</sub> (5-6kg/cm<sup>2</sup>)

##### (2) デュオプラズマトロンイオン源+マスフィルタ

加速粒子 : 陽子、重陽子、  
ヘリウム-3、  
ヘリウム-4

ビーム電流 : 3mA (3MeV 陽子)

### 2. 2 ビーム輸送系

本研究ではFNL全体に対する知的支援インタフェースの設計が最終的な目標だが、問題の簡単のためビーム輸送系(Beam Transport System:以下BTS)のみを本報告の対象とする。

BTSは制御器と情報獲得用計測器によって構成されている。制御器及び情報獲得計測器の意味について説明する。

#### ① H.V. [ $\mu$ A] (=High Voltage)

イオンに与える(与えたい)エネルギーから、校正曲線を用いてこの値を決定する。

#### ② Port [deg]

ビームの出力先。-30, -15, 0, 15, 30, 45, 60の7つがある。0度のみビーム調整用Port。

#### ③ Ion

イオン種。ここで一般的に使われているものはH<sup>1+</sup>, H<sup>2+</sup>, He<sup>+</sup>, D<sup>1+</sup>, D<sup>2+</sup>, D<sup>3+</sup>。全て1価のイオンであるが、質量が違うことを利用し質量分析を行うことで、特定のイオンビームを発生させることができる。

#### ④ Q-Lens [A] (=Quadrupole Lens)

4重極レンズ。2組の直交した電磁石によってビームラインを絞る。

#### ⑤ STR LR/UD [A] (=Magnetic Steerer)

ビームラインに磁場をかけることによって上下左右に曲げる。STR2は上下のみ。

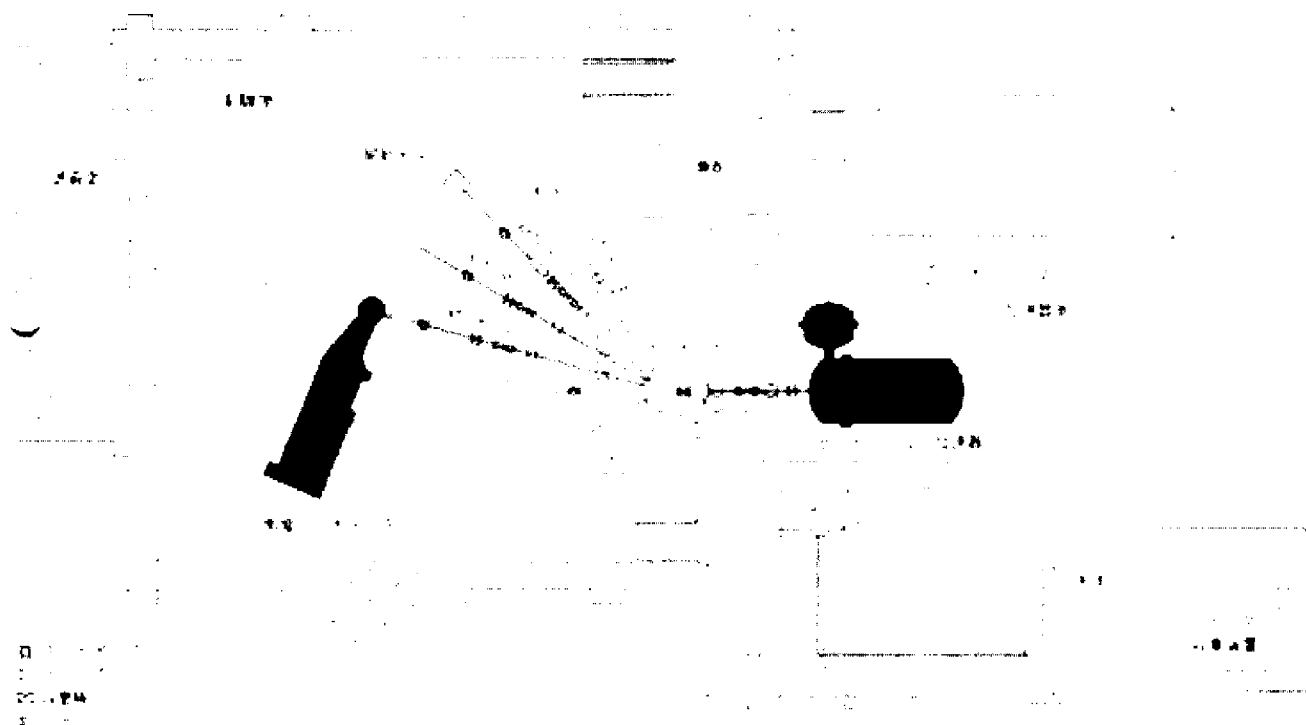


図1. FNL概略図

⑥ MAG [A] (=Magnet)

磁場でビームを曲げて各Portへと輸送する。

⑦ NMR [MHz]

磁場強度。イオンのエネルギー値、質量、電荷より計算する。イオン種の確認に用いられる。

⑧ AP [ $\mu$  A] (=Apature)

穴が空いていて周りにビームが当たると電流が流れる。ビームラインの絞り具合を見るために用いられる。値が小さい方がよい。

⑨ MB [ $\mu$  A] (=Magnet Buffle)

Portへの出力管の周りにビームがあたると電流が流れる。

⑩ SL/SR [ $\mu$  A] (=Slit Left/Slit Right)

ビームラインの左右の偏りを見る。

⑪ TGT [ $\mu$  A] (=Target Current)

最終的なビーム出力。この値を最大にすることが求められる。

①～③は実験目的によって設定されるパラメータ、④～⑥は制御用パラメータ、そして⑧～⑪はビーム電流計を用いた情報獲得用パラメータである。これらは図2のように配置されている。

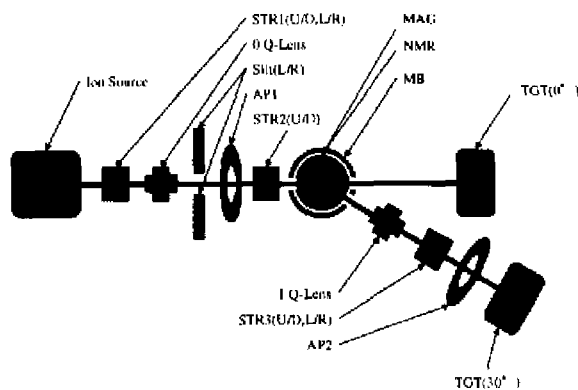


図2. BTS概略図

これらの機器の振る舞いについて説明する。

加速器を出たビームは、STR1により進行方向の微小角度を調整され、0-Q-Lensにより収束される。SL/SR、AP1に当たらずに通り抜けたビームは、STR2で上下方向を調整した後、Magで各ポートへと曲げられる。この時、Portへときちんと通り抜けないとMBに当たることになる。MBを通り抜け1-Q-Lensによって再度収束されたビームはSTR3で調整されTGTに到達する。

このように、この加速器のシステム構成を再度まとめれば、上流側のイオン発生装置で発生させた粒子を加速させ、それを下流側の適切なターゲットまで輸送するという比較的簡単な構図で説明すること

ができる。イオンの発生に関しては、起動からイオン発生までの手順がシーケンスとして比較的明確に定義されているために、操作上の熟練を要する要素は比較的少ない。これに対して、加速された粒子を、所定のターゲットまで導くビーム輸送は、多くの制御パラメータを並行して調整する必要があり、更に上流のパラメータ変更が下流に影響を与えるという因果関係があるために、その操作にはかなりの熟練が必要とされる。

## 2.3 オペレータの一般的操作

このシステムに対してオペレータはどのような操作を行うのか。一般的な手順を以下に述べる。

オペレータはビームを出すための目安として、まず過去の操作履歴データ(以下:ログ)を参照して、個々の制御器にその値を入力する。このログとはビームの出力が安定した状態での各パラメータの値を記録したものであり、この中から実験に適したもしくはそれに最も近い状態の時のログの値を使用する。その後ビームの上流から順に調整し、まず0度のPortにビームを出す。0度での調整を終えた後、ビームを実際に使用するPortに曲げる。TGTにビームが当たっていることを確認しながら上流から順に調整を行う。何度か上流から下流までの微調整を繰り返し、実験目的に対して適したビームを得る。

BTSを操作するうえで最も注意しなければならないことは、ビームを見失わないようにすることである。ビームを見失うというのはTGT=0となることである。端的にいえば、ビームの存在はTGTにあまっているということでは確認できない。輸送管内部でのビームの形状を見る術がないので、見失うと上級者でも回復に相当な時間を要する。

## 2.4 ユーザ

FNLは東北大学の研究施設として設立され、今日まで様々な研究に対して使用されてきた。ユーザのほとんどは大学の関係者であり、学生が大半を占めている。

ユーザは操作技術の習熟度とシステムの理解度を基準として以下の3つに大別できる。

### ・初級者

操作技術は未熟で、システムの原理についてもきちんと理解していない人が多い。学生の大半がここに該当する。運転経験は数回から2年程度。

### ・中級者

十分に操作を習熟しており、システムの原理もほ

とんど理解している。ルーチンワークに関しては問題は見当たらないがトラブルに対しては対応しきれないものがある。2年以上の運転経験を持つ学生が、主にこれに該当する。

・上級者

操作及びシステムの原理についても熟知している。主に教官。

中・上級者は運転操作の熟練者であるといえる。尚、初めてシステムに触れる初心者については、本研究では対象にしない。

## 2. 5 インタフェースの現状

加速器操作は制御コンソールにて行われる。

制御コンソールは、

- i) インターロック系
- ii) 高電圧発生系
- iii) イオン源系
- iv) ビーム輸送系
- v) 真空系

からなっている。



図3 現在のインタフェース (全体)

図3は加速器の現在のインタフェースである。基本的に運転操作のほとんどをここで行う。左側がビーム輸送系に、右上部は真空系、右下部には高電圧発生系、インターロック系、イオン源系が配置されている。

その他にはデータ計測用PC(但し、現在試験的に運用)とログデータの記録簿が常設されている。

BTSのインタフェースにおいては、基本的に右側に、MAGより上流の制御器及び計測器を、左側に、MAGより下流の制御器及び計測器が配置されている。制御器及び情報獲得用計測器の表示はその設置時期によって異なり、アナログメータとデジタルメータが混在している。

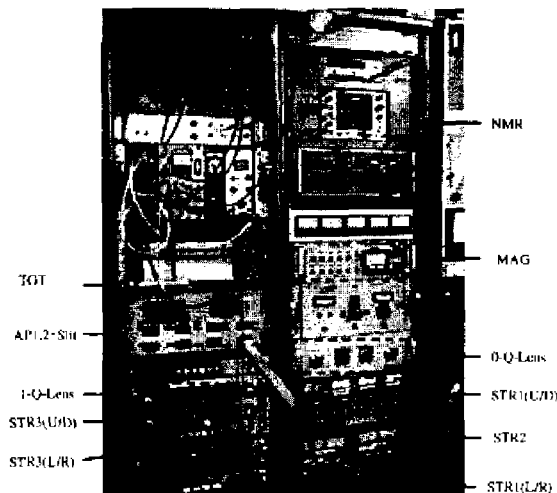


図4 BTSのインタフェース

## 2. 6 問題点

以上述べたように、今回対象としている実験用加速器(FNL)は、数多くのパラメータが複雑に絡み合うシステムである。しかしながら、計算に基づき設計された人工システムであり、その挙動は数学的に表現可能な物理法則に支配されているわけであるから、オペレータが適切な対象に関するメンタルモデルを構築できれば、その操作は職人的な熟練を要するというわけではないはずである。ここで、重要な点はこのような大規模・複雑なシステムの挙動をどのように人間に理解しやすい形で提供できるかという点にある。このような観点から考えると、現状のシステムには以下のような問題点がある。

1. 制御及び情報獲得に関連するパラメータは全て表示されているが、統合的な表示がなく、オペレータは対象のビームの状態を自分で再構成しなければならない。
2. 一般的な操作の過程からも明らかなように、同じ条件での運転においては、過去のログを参照してパラメータセッティングを行うことが多いが、このログ情報が紙の媒体でしか存在せず、その記録もオペレータが行っている。

## 3. 運転操作のタスク分析

### 3. 1 分析方法

タスク分析はユーザの操作や行動を観察し、記録・分析することによって、システム設計に関する問題点を抽出し、それを人間と機器の両側面から考察し、設計の要求項目や改善項目を明らかにする評価の手法である[1]。

現段階ではハードウェアの制約から、各パラメー

タの計算機への取り込みができ無い状況にあるため、ビデオ撮影を含めた観察とオペレータへのインタビューを行うことにより、タスク分析を行った。ビデオ撮影では主に運転手順を把握及び理解することに勤め、その後オペレータへインタビューすることにより操作の意図や、視点解析の参考にした。

### 3. 2 観測対象者

各ユーザの中から上級者を除くスキルレベルごとに一人ずつを選んで計2名を観測対象とした。

- ・初級者  
運転歴6ヶ月  
M2 女性
- ・中級者  
運転歴3年  
D3 男性

### 3. 3 操作履歴

それぞれの観測対象者の操作履歴を図5(次頁)に示す。横軸に時間をとり、その時間帯にどの制御器を操作したか、また、どの計測器から情報を獲得していたかを示している。ただし、PCは計測器の情報をPCを介して表示したディスプレイからの情報獲得を表している。また、各制御器ごとの操作時間の累計を図6に示す。

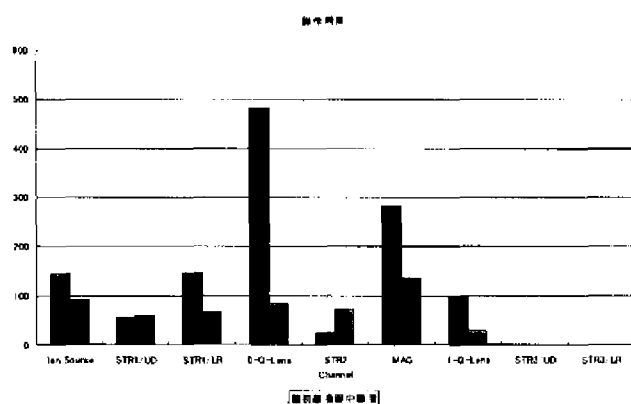


図6. 各制御器ごとの操作時間の累計

但し、ビデオ撮影による観察では視点解析は困難であり、特にPCディスプレイ上においてどのパラメータに着目しているのかを読み取ることはできなかった事を断っておく。

## 4. タスク分析の結果

### 4. 1 熟練度の違いによる影響

操作の流れを見ると、中級者の操作には初級者のそれには無い、ある一定の規則性が見出せる。これは操作の手順を経験により自分の中でパターン化し

て、操作ミスの軽減や運転時間の短縮に努めていると考えられる。

中級者は解説しながら運転をしてくれたので、その視点についてはある程度の解析を行えた。だが実際には、解析結果よりも多くのパラメータを瞬時的かつ無意識に読み取っている。ここに初級者と中級者との情報獲得の仕方に大きな差異が見られる。中級者の視線は目まぐるしく動くがそれに比べると1つの計器に固執する傾向が見られる。中級者は多くのパラメータから輸送管内のビームの形状を推察し操作に役立てているが、初級者は場当たりに良いパラメータを模索しているに過ぎない。このことが操作時間の差異にもっとも大きく影響している点であると考えられる。

また、制御器によっても操作時間に大きな差が見られる。特にQ-Lensの調整に要する操作時間に初級者と中級者との違いが顕著に表れている。制御器のほとんどはダイヤルノブを回すことによって、その値を調整しており、これらの中で特別な操作方法を必要とするのがQ-Lensである。Q-Lensは2組の直行した電磁石によってビームを収束させる制御器であり、それぞれの電磁石対に対応した2つのダイヤルノブを同時に操作するのが一般的である。この操作が初級者にとって最も困難であり、ビーム状態の推察を行う上で妨げになっていることがインタビューから確認できた。

### 4. 2 BTS 操作における規範的な流れ

BTSの操作におけるタスクは、その手順から3つのフェイズに分けて考える必要がある。

Phase-1では0度のPortにビームを到達させることを目標とし、ここでのタスクはイオン源の調整とビームの調整とに分けられる。ビームの調整は更に収束タスクと位置調整タスクに分けられる。収束タスクはQ-Lensの調整によって行われる。ただし、このフェイズでは加速器が正常な動作を確認する事が重要であって、厳密なビームの収束性や方向の調整を重要視しない。イオン源の調整については本報告では省略する。

Phase-2では実験で使用する角度のPortへビームを適切に導き、TGTにビームを確認するまでの過程である。この段階では、ビーム電流の大きさは重要視しない。

Phase-3ではTGTにおけるビーム電流を最大にすることを目標としてビームの調整を行う。このタスクもPhase-1と同様にビームの収束タスクと位置

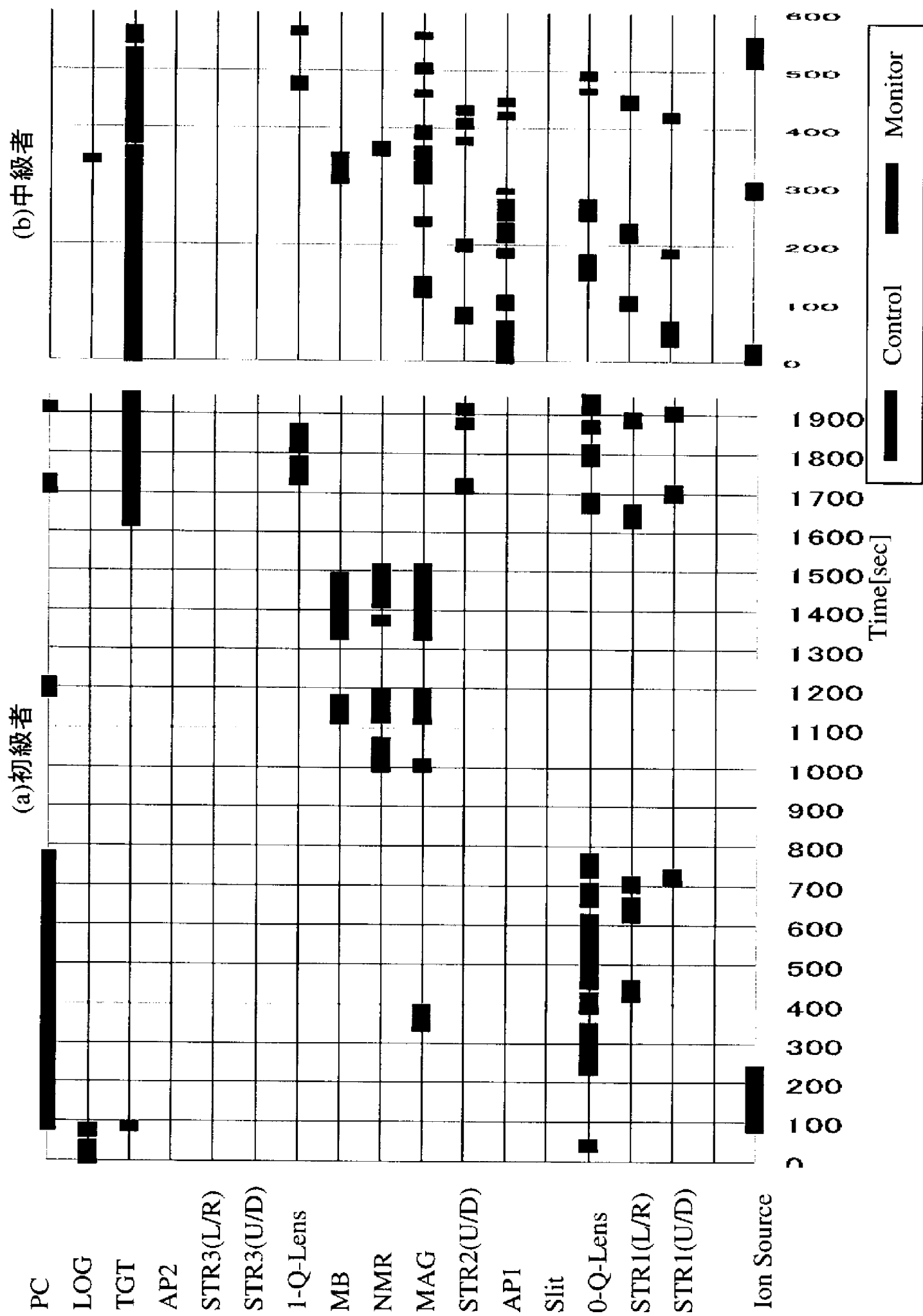


図5. ユーザごとの操作履歴

調整タスクとに分けられる。

どのフェイズにおいても、収束タスクが重要であることは、ビームの物理的特性から容易に推察できる。ビームの収束タスクは更に0-Q-Lensの制御・1-Q-Lensの制御に分けて考えることができる。

位置調整タスクは更に縦方向と横方向とに分けて考える。縦方向の制御はSTR1(U/D)の制御・STR2(U/D)の制御・STR3(U/D)の制御に分けられ、横方向の制御はSTR1(L/R)の制御・MAGの制御・STR3(L/R)の制御に分けられる。

また、全ての制御タスクは何らかの情報獲得タスクを伴う。情報獲得タスクも各計測器(Slit・API・NMR・MB・AP2・TGT)ごとに分けて考えられ、制御タスクに用いている制御器よりも下流の計測器が情報獲得タスクの対象となる。

これらを踏まえた上で、BTS操作の規範的流れを図7、図8に示す。

#### 4.3 タスク分析の結果から得られるインタフェース設計の指針

本報告の対象システムであるFNLは、多くの種類の実験のために設立されたものであり、最終的に、実験条件からの要求に応じた適切なビームの状態を実現することが要求される。そのビームの条件としては、安定でかつ同一条件下での再現性を持つことである。更には、人的労力の軽減、時間短縮によるランニングコストの削減等が要求されている。

タスク分析の結果から得られた規範的な操作の流れ、及び、2.6節の問題点の指摘から、より効率的に運転を支援するためには以下のような条件がインタフェースに求められると考えられる。

##### ・パラメータの統合的な表示

前節で述べた規範的流れを基にして、計器をただ羅列するのではなく、全体的な流れをイメージでき

るインタフェースは、特に初級者に対して、運転支援において有効であると考えられる。

##### ・熟練運転員の操作モデルに基づく支援の提供

タスク分析の結果から、熟練運転員の運転操作にはある一定のパターンがあり、それに従うことでより効率的なビームのハンドリングが行えていることが示されている。このような熟練運転員の操作のモデルに基づき、初級者が運転する場合の操作のアドバイスを提供することは、初級者の教育という観点からも重要なのではないかと考えられる。

##### ・PCによるログの収集及びデータベースの構築

運転作業の効率化という観点からは、PCによるログの収集及びデータベースの構築が重要な要件となる。このデータベースを用いて、ログデータの入力及びリロードを可能にすることにより入力作業が簡略化され、ビームを見失うといった操作ミスを行った場合、その再発見が容易におこなうことができる。この機能に関しては熟練度に関わらず有効な支援であると考えられる。

##### ・多変数最適化問題の視覚的支援

ビームの収束、位置調整の問題は、多変数最適化問題であり、タスク分析を見ると人間はある程度試行錯誤的に準最適解を見出す努力をしている。この過程において、人間の作業を視覚的に支援するインタフェースを提供することができれば、この過程をより効率化することが可能になると思われる。

但し、上記の要件はあくまでも規範的な操作を行う場合を仮定していることに注意する必要がある。実際の運転においては、この規範的な流れから逸脱する挙動もしばしば観測されており、それが意味で熟練たる所以であると意味付けることも可能である。このような規範的でない状況に応じた認知的挙動に関してはNaturalistic Decision Making

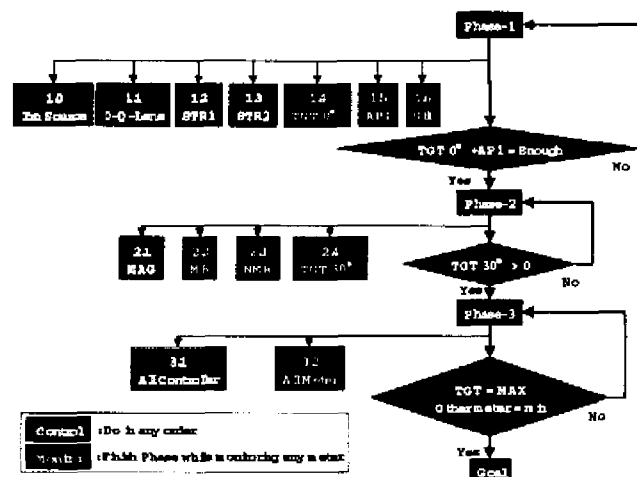


図7 BTS操作の規範的流れ

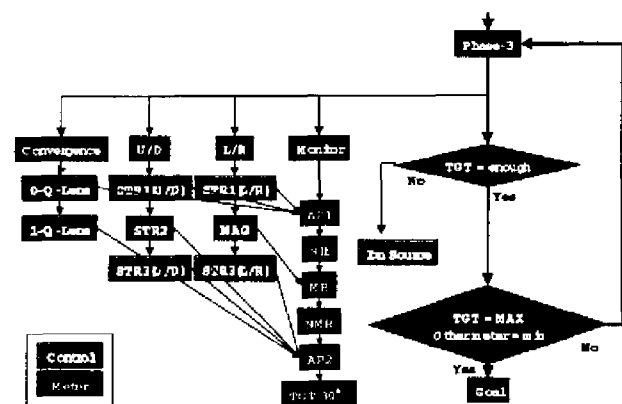


図8 Phase-3における規範的流れ

という分野で近年着目されている。このような熟練者の規範から外れた行為に関しても、それを支援するようなインタフェースを考える必要があるであろうが、それは今後の課題とする。

## 5. 結論

本報告では、実験用加速器を対象にして、ユーザのタスク分析を通じてインタフェースの高度化のための条件に関する検討を行った。タスク分析の結果から、規範的な操作手順を明らかにして、それに基づいてどのような支援が望まれるかを検討した。熟練度の違いによる操作の行い方の差異もタスク分析の結果から見出すことができ、この知見のインタフェース高度化のための重要な指針となった。

現時点では、計測のハードウェアの制約から、ログ情報の取得は困難であるが、近日中にデータの取り込みのハードウェアが完成する予定である。今後は、今回得られた知見に基づくインタフェースのプロトタイプ構築を行い、現場のユーザの評価を得て、また、更に多くの運転事例の分析を通じて、より効率的なインタフェースの実現に向けて研究を続ける予定である。

## 参考文献

- [1] 田村博(編):ヒューマンインタフェース, 399/402, オーム社1998