

打切り事象を考慮したクライストロン系の 平均トリップ間隔の算出

原子力機構 武井 早憲

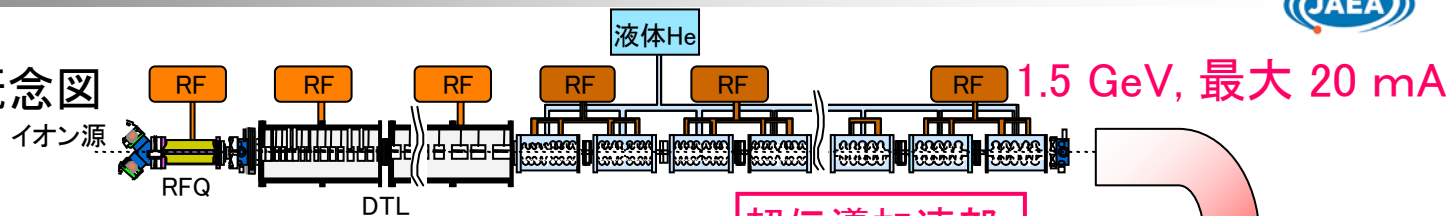
目次

1. 加速器駆動未臨界炉
2. 研究の背景と目的
3. カプラン・マイヤー推定法による打切り事象を含む平均故障間隔
4. KEK入射器 クライストロン系の平均トリップ間隔の算出
5. まとめ

1. 加速器駆動未臨界炉: ADS (Accelerator Driven System)



超伝導線形加速器概念図



ADSの仕組み:

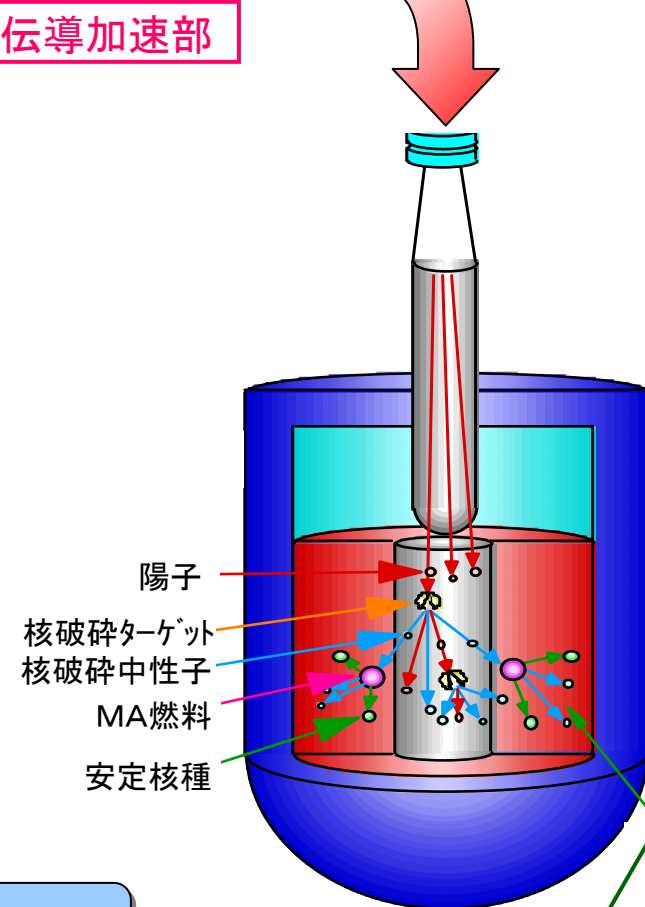
- ・超伝導加速器で大強度の陽子を高効率で加速。
- ・陽子はビームダクト・ビーム窓を通過して鉛・ビスマス(Pb-Bi)に入射。
- ・陽子はPb-Biとの核破砕反応で大量の中性子を発生。
- ・その中性子によりMAを核分裂反応で核変換。
- ・さらに核分裂で発生した中性子も核変換に使用。
→核分裂の連鎖反応で、1個の中性子を20個に増倍。
- ・核分裂で発生する熱で発電し、売電及び加速器に供給。

ADSの特徴:

- ・加速器を止めれば連鎖反応は停止 → 安全性が高い
- ・MAを主成分とした燃料を用いるので、効率的な核変換が可能
- ・Pb-Biは化学的に不活性。

解決すべき事項の一項目:

- ・ビームトリップ時に未臨界炉に熱衝撃を与えるため、加速器の信頼性を向上させる



核分裂連鎖反応による核変換

ADS概念図



2. 研究の背景と目的

- ビーム停止事象が少ない大強度陽子加速器を開発しなければならないが、加速器の運転データからどのようにビーム停止頻度を評価すべきか統一した見解すら得られていない。
- クライストロン系の平均トリップ間隔の評価では、従来、クライストロン系が偶発的に停止したトリップ事象のみを対象としてきた。
- 一般に、製品の寿命評価では、使用開始から製品が故障に至るまでの時間と使用開始からまだ故障に至らずに途中で観測が打切られた時間を含めて寿命を評価している。

加速器の運転データからビーム停止頻度を算出する方法を検討するために、KEK入射器のクライストロン系における平均トリップ間隔を、従来の評価では含めていない打切り事象と呼ばれる停止事象を含めて評価し、従来の結果と比較する。

3. カプラン・マイヤー推定法による打切り事象を含む平均故障間隔

① 定義など

「打切り事象」とは、

運転員によって装置などの運転が途中で打切られる事象と定義する。
打切り事象が発生しても、装置などの故障と見なさない。

このため、その時点での故障率はゼロであり、累積生存率は変わらない。

「クライストロン系の停止事象」とは、

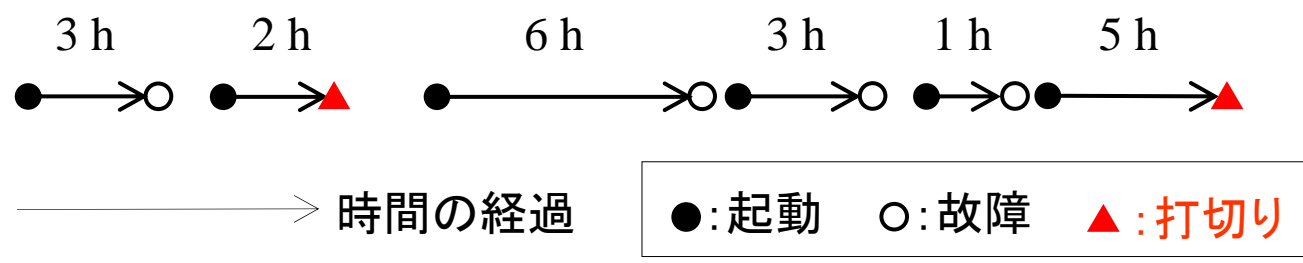
偶発的にクライストロンが停止する事象(トリップ事象)と、運転員が手動でクライストロンを停止させた事象(打切り事象)と定義する。

「カプラン・マイヤー推定法」とは、

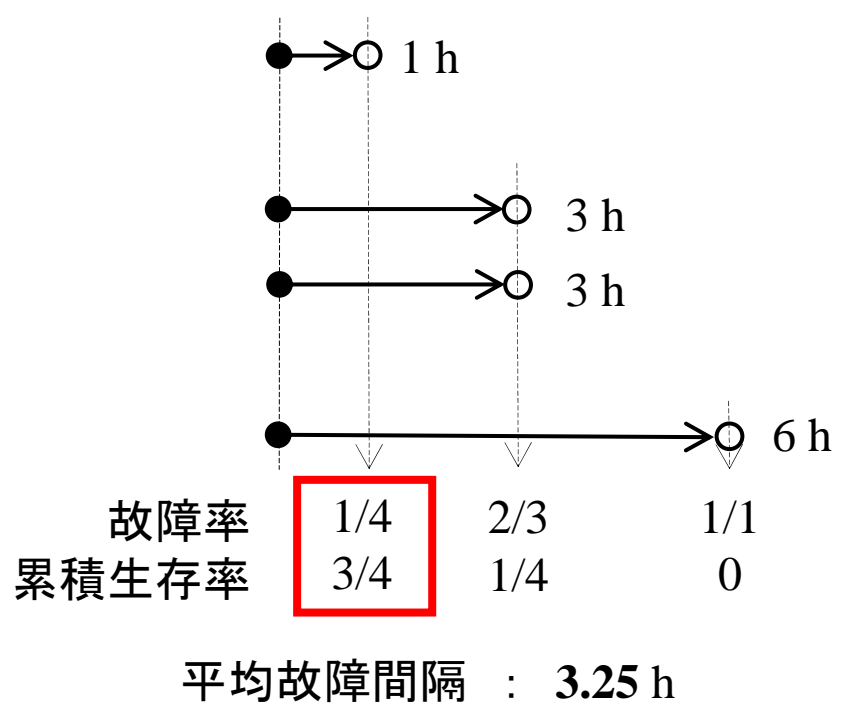
どのような確率密度関数も仮定せず、ノンパラメトリックに平均故障間隔(以下、平均トリップ間隔)を推定する方法である。医学分野における治療の評価、工学分野における製品の寿命評価などに幅広く利用されている。

3. カプラン・マイヤー推定法による打切り事象を含む平均故障間隔

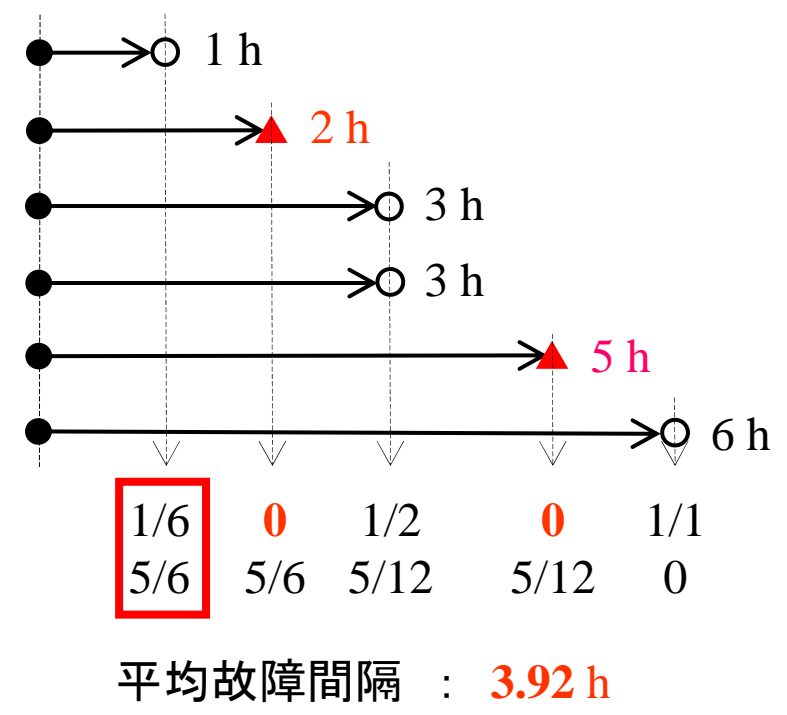
② 例



(1) 打切り事象を含めずに評価した場合



(2) 打切り事象を含めて評価した場合



③ 打切り事象を含めることの効果

打切り事象を含めた平均故障間隔(平均トリップ間隔)の評価では、打切り事象が生じるまでクライストロンが運転していた実績を加味することができる。

このため、次のような効果が期待される。

- ① 或る運転時間における累積生存率は、打切り事象を含まない場合よりも大きくなる。

反対に、累積生存率(累積トリップ率)は、打切り事象を含まない場合よりも小さくなる。

- ② 平均故障間隔(平均トリップ間隔)は打切り事象を含まない場合よりも長くなる。

4. KEK入射器 クライストロン系の平均トリップ間隔の算出

① 運転データの入手

- ・2005年度(2005年4月1日～2006年3月31日)までの運転データのうち、クライストロンをはじめ、各機器のステータスを集めた電子ファイル(gwalarm, 11.5 MB)
- ・小川氏らの解析と独立に実施する。

② 運転状況の確認

同期間における運転記録(ログノート)を調査し、打切り事象に該当する停止事象を抽出する。

主な打切り事象として、

- ・約2週間毎に実施される保守作業
- ・クライストロン系以外からの停止要求

③ カプラン・マイヤー推定法による平均トリップ間隔の算出

- ・60系統のクライストロンが**独立**と仮定して、系統毎に運転データを分類する。
- ・データ分析ツール**JMP**の**生存時間分析**による平均トリップ間隔の算出



4. KEK入射器 クライストロン系の平均トリップ間隔の算出

抽出された停止事象数: 16,421 回

うちトリップ事象数: 13,453 回

残り2,968 回は打切り事象である。

計画運転時間: 6815.2 時間

⇒ 平均トリップ間隔: 30.4 時間/KLY

平均トリップ率: 0.790 回/KLY/day

$$\frac{6815.2}{(13453 / 60)} = 30.4$$

既報(小川氏より)

RFトリップ事象数: 12,467 回

RFトリップ率: 0.726 回/KLY/day

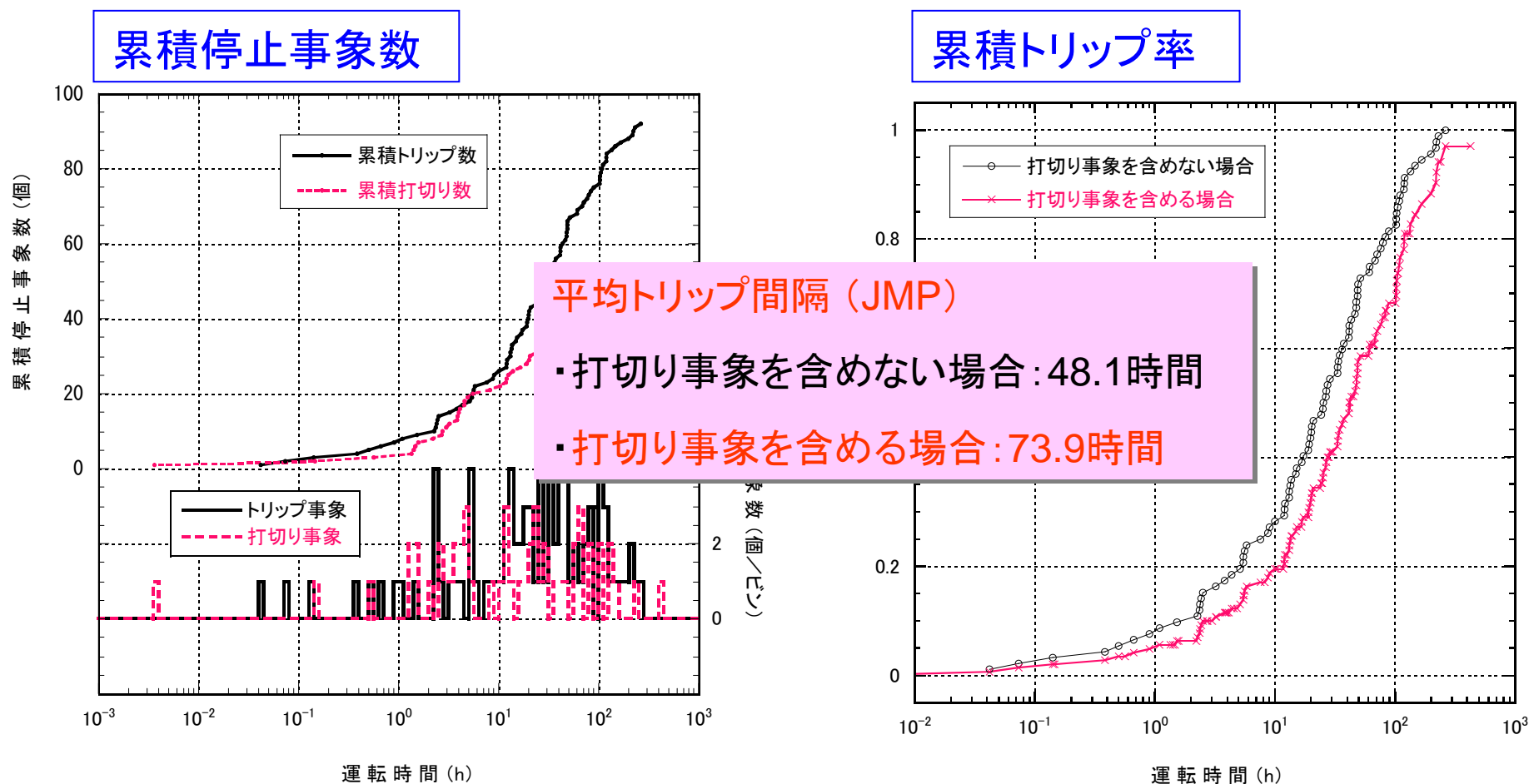
計画運転時間: 6988 時間



抽出した結果は、
既報とほぼ同じ内容となった。

4. KEK入射器 クライストロン系の平均トリップ間隔の算出

典型的なクライストロン系(番号KL_B1)における累積停止事象数と累積トリップ率

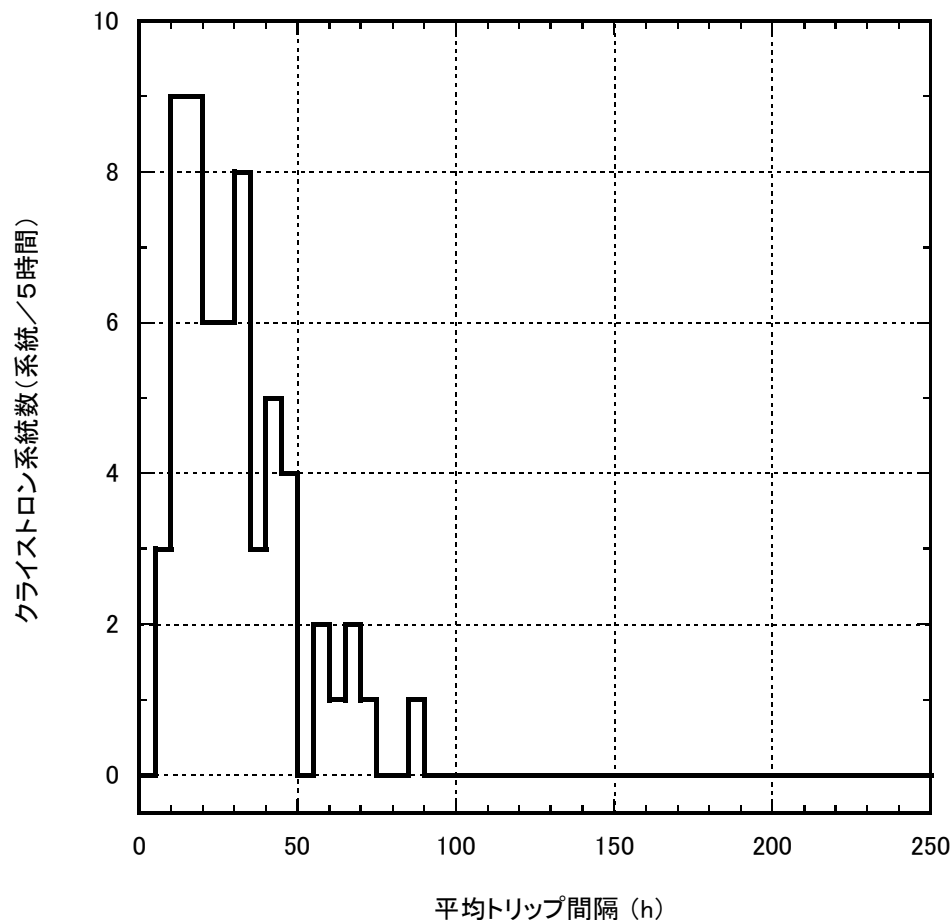


4. KEK入射器 クライストロン系の平均トリップ間隔の算出

各クライストロン系の平均トリップ間隔

(1) 打切り事象を含めない場合

平均トリップ間隔の平均値: 30.6 時間



簡易な評価値(30.4時間)と
ほぼ一致する。



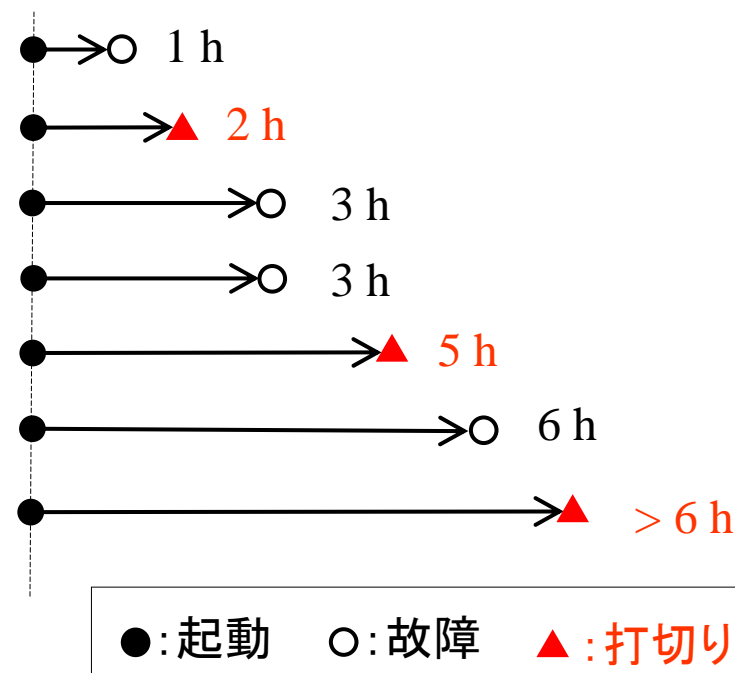
4. KEK入射器 クライストロン系の平均トリップ間隔の算出

各クライストロン系の平均トリップ間隔

(2) 打切り事象を含める場合

運転時間が最も長い故障事象(トリップ事象)よりも、**運転時間が長い打切り事象がある場合は、「バイアスが有る場合」として取扱いに注意しなければならない。**

※ 本研究では「**バイアスが有るクライストロン系**」の平均トリップ間隔を除外することとする。

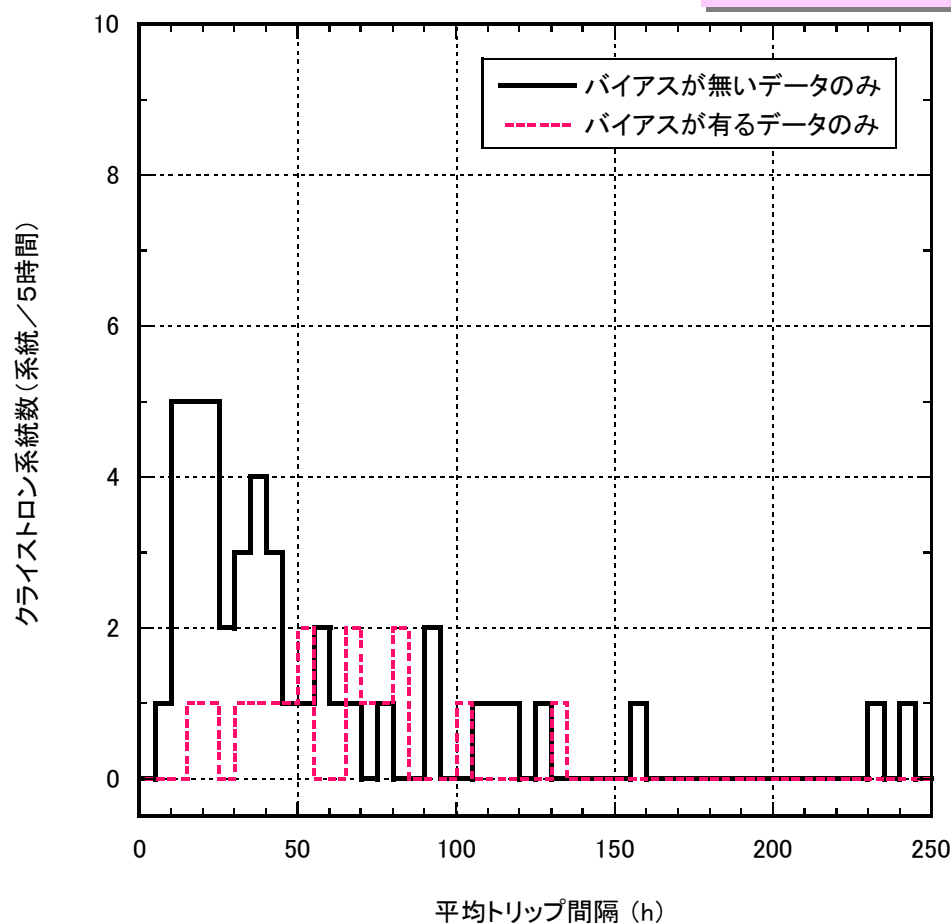


4. KEK入射器 クライストロン系の平均トリップ間隔の算出

各クライストロン系の平均トリップ間隔

(2) 打切り事象を含める場合

平均トリップ間隔の平均値: 54.6 時間
(バイアスが無いクライストロン系のみ)



打切り事象を含めない場合
より1.8倍長くなる。



- KEK入射器クライストロン系におけるトリップ事象の平均トリップ間隔を、従来の評価では含めていない打切り事象を含めて算出した。
- その結果、従来と比較して、平均トリップ間隔が1.8倍長くなった。
- このため、打切り事象を含めた加速器の運転データの収集や解析が必要となることがわかった。

今後、学会発表(※)や論文投稿(NIM)を行う予定。

※日本原子力学会「2009年秋の年会」2009.9.17 (H37)





運転時間 t_i (区間番号 i) における累積生存率の最尤推定量: $\hat{S}(t_i)$

$$\hat{S}(t_i) = \prod_{j=1}^i (1 - \hat{p}_j)$$

但し、区間番号 i ($t_{i-1} < t \leq t_i$) における累積生存率の最尤推定量を \hat{p}_i

$$\hat{p}_i = \frac{d_i}{n_i}$$

ここで、 n_i は区間が始まる時に故障する可能性がある装置の数(リスクの大きさ)、 d_i は同区間内で故障する装置の数である。

$$n_i = n - \sum_{j=0}^{i-1} d_j - \sum_{j=0}^{i-1} r_j, \quad i = 1, \dots, m$$

ここで、 r_i は同区間が終了する時点まで装置が正常に運転し、運転が打ち切られた数(右側打ち切り数)である。

平均生存時間(平均故障間隔、平均トリップ間隔): $\hat{\mu}$

$$\hat{\mu} = \sum_{i=1}^m \hat{S}(t_{i-1})(t_i - t_{i-1})$$

例題 (1) 打切り事象を含めない場合 (故障事象のみの場合)^{17/13-}



| 運転時間 (時間) | 対象となる運 転時間の区間 | n_i | d_i | r_i | 故障率 \hat{p}_i | 累積生存率 $\hat{S}(t_i)$ | 累積故障率 $\hat{F}(t_i)$ |
|--------------|------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | $0 < t \leq 1$ | 4 | 1 | 0 | 1/4 | 3/4 | 1/4 |
| 3 | $1 < t \leq 3$ | 3 | 2 | 0 | 2/3 | 1/4 | 3/4 |
| 6 | $3 < t \leq 6$ | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |

(平均故障間隔)

$$\begin{aligned}
 &= 1 \times (1 - 0) + \frac{3}{4} \times (3 - 1) + \frac{1}{4} \times (6 - 3) \\
 &= \frac{13}{4} = 3.25 \text{ (時間)}
 \end{aligned}$$

例題 (2) 打切り事象を故障事象を区別した場合



| 運転時間 (時間) | 対象となる運 転時間の区間 | n_i | d_i | r_i | 故障率 \hat{p}_i | 累積生存率 $\hat{S}(t_i)$ | 累積故障率 $\hat{F}(t_i)$ |
|--------------|------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | $0 < t \leq 1$ | 6 | 1 | 0 | 1/6 | 5/6 | 1/6 |
| 2 | $1 < t \leq 2$ | 5 | 0 | 1 | 0 | 5/6 | 1/6 |
| 3 | $2 < t \leq 3$ | 4 | 2 | 0 | 1/2 | 5/12 | 7/12 |
| 5 | $3 < t \leq 5$ | 2 | 0 | 1 | 0 | 5/12 | 7/12 |
| 6 | $5 < t \leq 6$ | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |

(平均故障間隔)

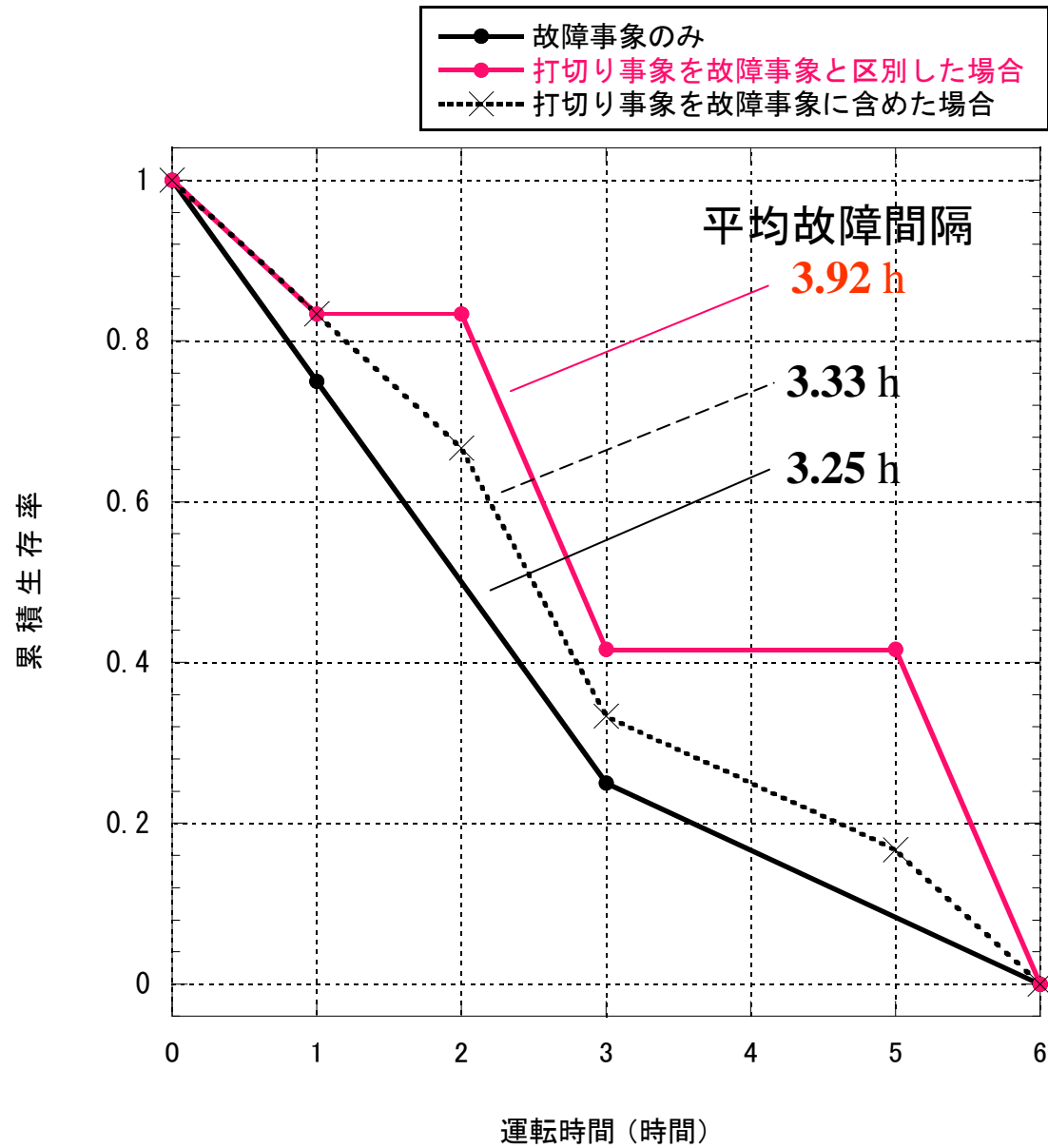
$$\begin{aligned}
 &= 1 \times (1 - 0) + \frac{5}{6} \times (2 - 1) + \frac{5}{6} \times (3 - 2) + \frac{5}{12} \times (5 - 3) + \frac{5}{12} \times (6 - 5) \\
 &= \frac{47}{12} = 3.92(\text{時間})
 \end{aligned}$$

例題 (3) 打切り事象を故障事象に含めた場合

| 運転時間 (時間) | 対象となる運 転時間の区間 | n_i | d_i | r_i | 故障率 \hat{p}_i | 累積生存率 $\hat{S}(t_i)$ | 累積故障率 $\hat{F}(t_i)$ |
|--------------|------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | $0 < t \leq 1$ | 6 | 1 | 0 | 1/6 | 5/6 | 1/6 |
| 2 | $1 < t \leq 2$ | 5 | 1 | 0 | 1/5 | 2/3 | 1/3 |
| 3 | $2 < t \leq 3$ | 4 | 2 | 0 | 1/2 | 1/3 | 2/3 |
| 5 | $3 < t \leq 5$ | 2 | 1 | 0 | 1/2 | 1/6 | 5/6 |
| 6 | $5 < t \leq 6$ | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |

(平均故障間隔)

$$\begin{aligned}
 &= 1 \times (1 - 0) + \frac{5}{6} \times (2 - 1) + \frac{2}{3} \times (3 - 2) + \frac{1}{3} \times (5 - 3) + \frac{1}{6} \times (6 - 5) \\
 &= \frac{10}{3} = 3.33(\text{時間})
 \end{aligned}$$





| No. | 評価方針 | 停止事象数 | トリップ事象数 | 打切り事象数 |
|-----|------------------------|--------|---------|--------|
| 1 | トリップ事象のみ評価する。 | 16,421 | 13,453 | 0 |
| 2 | 打切り事象をトリップ事象と区別し、評価する。 | 16,421 | 13,453 | 2,968 |
| 3 | 打切り事象をトリップ事象に含めて評価する。 | 16,421 | 16,421 | 0 |



| No. | 評価方針 | Kaplan・マイヤー推定法による平均トリップ間隔の平均値 | 簡易な評価値 |
|-----|------------------------|-------------------------------|---|
| 1 | トリップ事象のみ評価する。 | 30.6 時間 | $\frac{6815.2}{(13453/60)} = 30.4$ (時間) |
| 2 | 打切り事象をトリップ事象と区別し、評価する。 | 54.6 時間 ^(a) | 無し |
| 3 | 打切り事象をトリップ事象に含めて評価する。 | 31.8 時間 | $\frac{6815.2}{(16421/60)} = 24.9$ (時間) |



トリップ事象のみを対象とした平均トリップ間隔：30.6 時間

(長所)

実際の平均トリップ間隔に一致している。

(短所)

メンテナンス間隔など、施設に固有な運転条件に依存しているため、他のクライストロン系と厳密に比較することが困難である。

打切り事象をトリップ事象と区別して評価した平均トリップ間隔：54.6 時間

(長所)

メンテナンス間隔など、施設に固有な条件に依存しないため、汎用性がある。
このため、他のクライストロン系との比較に使用できる。
また、データベースとしても使用できる。

(短所)

実際の平均トリップ間隔と乖離している場合がある。



既報(小川氏より)

添付pdfファイルの2005年度のデータ

RFトリップ事象数: 12,467 回

RFトリップ率: 0.726 回/KLY/day

計画運転時間: 6988 時間

(確認事項)

- ① RFトリップ事象数の12,467 回の中には、定期メンテナンスなどで停止した回数が入っているのか。以前お聞きした範囲では、含まれていないとのことでしたが。
- ② RFトリップが発生し、その後復帰し、短時間(1~3秒程度)で再びRFトリップが発生した場合、RFトリップ事象数は何回と数えますか。私の解析では2回と数えていますが、以前お聞きした範囲では、1回と数えているとのことでしたが。