

## 英国の原子力発電所低圧蒸気タービンのバースト

【1969年9月19日、英国 イングランド サマセット】

新田明人((財)電力中央研究所 材料科学研究所)

小林英男(東京工業大学大学院 理工学研究科)

英国のイングランド南西部のサマセット(Somerset)にあったヒンクレイ・ポイント(Hinkley Point ) 'A'原子力発電所(2000年5月閉鎖)では、1965年4月の運転開始後 33,360h 経った 1969年9月19日に5号タービン発電機が低圧タービンの焼き詰めディスクの脆性破壊により甚大な破損を被った。その数分前に5号ユニットはオーバースピード試験のため系統から切り離されており、回転数が3,200rpmになったときに事故が起こった。ロータシャフトは5箇所破壊しており、低圧タービンのAロータのディスク3枚が大きな破片となって飛散した。これはディスクキー溝における応力腐食割れによるものであり、このような回転体の脆性破壊によるタービン発電機の大事故は英国では初めての経験であった。事故当時、現場には7名の運転員がいたが、幸いにも死傷者は出なかった。

### 1. 機器

ヒンクレイ・ポイント(Hinkley Point )"A"原子力発電所は、コールドタービン型マグノックス原子炉2基と単機容量87MWのタービン発電機6基で構成されている。設計蒸気条件は高圧タービンが4.24MPa、360、低圧タービンが1.07MPa、346であったが、事故を起こした1969年に原子炉内の二酸化炭素による軟鋼の腐食のために蒸気温度がそれぞれ10下げられた。タービンの定格回転数は3,000rpmである。

### 2. 事象

英国のヒンクレイ・ポイント(Hinkley Point )"A"原子力発電所において、1965年4月の運転開始後 33,360h 経った 1969年9月19日に、図1に断面図を示す5号タービン発電機が低圧タービンの焼き詰めディスクの脆性破壊により甚大な破損を被った。図2に事故後の様相を示す。その数分前に5号タービン発電機はオーバースピード試験のため系統から切り離されており、回転数が3,200rpmになったときに事故が起こった。ロータシャフトは5箇所破壊しており、図3に示すように、低圧タービンのAロータのディスク3枚が大きな破片となって飛散した。このような回転体の脆性破壊によるタービン発電機の大事故は英国では初めての経験であった。事故当時、現場には7名の運転員がいたが、幸いにも死傷者は出なかった。

#### (1) フォールトツリー解析の結果

破壊形態、破壊のメカニズムとプロセスに着目したフォールトツリー解析(図4)

破壊の起点となった低圧タービンディスクは酸性平炉法による3Cr-0.5Mo鋼で製造されており、イオウ、リンの含有量が多目であったことから、熱処理プロセス中に焼き戻し脆化を生じ破壊靱

性が低い材料であった。また、同ディスクはシャフトに焼き嵌めされていたが、固定キーの装着のため半円形の溝が設けられており、応力集中源となっていた(図5)。このような状態において、特定するのは困難であったが、蒸気中の水酸化ナトリウム等の環境因子が関与したと思われる応力腐食割れが発生し、高々深さ 1.6mm 程度のき裂になった時点で脆性破壊に至った。

機器の設計と製作における不適切・不良に着目したフォールトツリー解析(図6)

ディスク製造時の鍛造・熱処理法、磁粉・超音波検査や引張・衝撃試験の結果には問題は見当たらなかった。また、設計応力、付加的あるいは異常な応力により起こり得る破損モードなどを調査したところ、設計上の問題はないことが明らかになった。そこで、破壊したディスクのフラクトグラフィ等による詳細調査とともに、同ディスクから採取した試験片を用いた組成分析、引張試験、疲労およびき裂進展試験、シャルピー衝撃試験、破壊靱性試験、応力腐食割れ試験が行われた。その結果、応力集中源となる焼き嵌めディスクのキー溝において、低圧蒸気中の環境因子が関与した応力腐食割れが発生・進展し、酸性平炉法による 3Cr-0.5Mo 鋼の低靱性と相俟って、脆性破壊に至ったものと推察された。

## (2) イベントツリー解析の結果(図7)

酸性平炉法による 3Cr-0.5Mo 鋼製の焼き嵌めディスクのボア表面に、低圧蒸気中の環境因子が関与したと思われる応力腐食割れが発生し、ディスクキー溝による応力集中と焼き戻し脆化による低靱性が相俟って、低圧タービンの脆性破壊に至った。

## 3. 経過

Hinkley Point “A”原子力発電所は、コールダーホール型マグノックス原子炉 2 機と単機容量 87MW のタービン発電機 6 機で構成されていた。設計蒸気条件は高圧タービンが 4.24MPa、360 、低圧タービンが 1.07MPa、346 であったが、事故を起こした 1969 年に原子炉内の二酸化炭素による軟鋼の腐食のために蒸気温度がそれぞれ 10 下げられた。タービンの定格回転数は 3,000rpm であった。

事故の数分前に 5 号ユニットはオーバースピードテストのため系統から切り離された。同ユニットの回転速度は徐々に上昇し、タコメーターを確認していた運転員は回転速度が 3,200rpm になったときに事故が起こったと断言した。その際、大きな爆発音とともに、低圧タービンのところから保温材などと一緒に炎が上がったが、その後数秒のうちに爆発が起こり、発電機から出た炎で火の海となった。

事故当時、6 機のタービン発電機はすべて運転中であったが、原子炉と 1、2 および 3 号ユニットには損傷はなく、運転が続けられた。しかし、4 および 6 号ユニットには僅かな損傷があり一時停止された。事故当時 7 名のタービン運転員が直ぐ近くにいたが、死傷者は出なかった。直ちに英国中央電力庁(CEGB)は正式な調査委員会を設置し、事故原因の究明に当たった。原因はディスク孔のキー溝上部における応力腐食割れ(SCC)によるものと考えられ、他の多くのディスクでも SCC が認められた。ディスクは 3Cr-0.5Mo 鋼製であり基準は満たしていたが、熱処理プロセス後の炉冷中の焼き戻し脆化のため破壊靱性が低下しており、キー溝上部の応力集中により約 1.6mm 深さのき裂があれば脆性破壊が起こり得る状態であった。なお、SCC の発生原因に関する調査は並行して行われた。

#### 4. 原因

原因はディスク孔のキー溝上部における応力腐食割れによるものであった。ディスク孔とキー溝の応力腐食割れは他の多くのディスクでも発見された。このディスクは酸性平炉法による3Cr-0.5Mo 鋼製であり通常の基準を満たしていたが、熱処理プロセス中の焼戻し脆化のため、その破壊靱性は低く、キー溝上部の応力集中により高々深さ約 1.6mm のき裂が脆性破壊を引き起こすには十分な大きさであった。

#### 5. 対処

英国で初めて経験する事故であり、事故後直ちに専門家、メーカー関係者を集めた調査委員会が設置され、膨大な調査や種々の試験・解析が行なわれ、原因究明が進められた。しかし、明確な原因の特定には至らず、状況証拠から応力腐食割れであると結論付けられた。

#### 6. 対策

調査委員会が行なった調査の範囲内では明確な対策は決められず、更なる検討結果を待たざるを得なかったが、応力腐食割れの原因となり得る環境因子(給水中の鉄分等を除去するイオン交換樹脂の再生処理に伴う NaOH や硫酸の混入)の観点から再生処理法が見直された。また、より破壊靱性の高い材料やキー溝のないディスクの採用なども行われた。

#### 7. 知識化

- ・応力腐食割れは条件(材料、環境、応力)次第で起こる厄介な損傷  
(特に、環境因子の特定が困難！)
- ・応力集中は極力避けるべし！

#### 8. 背景

ディスク製造時の鍛造・熱処理法、磁粉・超音波検査や引張・衝撃試験の結果には問題は見当たらなかった。また、設計応力、付加的あるいは異常な応力により起こり得る破損モードなどを調査したところ、設計上の問題はないことが明らかになった。すなわち、当時の設計、製作、検査に技術上の問題はなかった。ただし、ディスク材料に低靱性の酸性平炉プロセスによる 3Cr-0.5Mo 鋼が一部使用されていたこと、焼き嵌めディスクで応力集中源になるキー溝を設けていたことが問題にはなるが、これらも当時としては英国のみならず他国でも広く採用されていた技術であり、このような事故を予見させるものではなかった。いずれにしても、事故の引き金になったのは応力腐食割れの発生であり、応力腐食割れは材料、環境、応力の条件次第で起こりえる損傷である。事故の調査でも非常に苦労したように、特に環境因子を特定するのは困難であることが多い。言い換えれば、応力腐食割れは思わぬところで起こる損傷であり、完全に防止することは不可能かも知れない。

#### 9. 主シナリオ

1. 無知
2. 知識不足

3. 経験不足

---

4. 製作

5. ハード製作

6. 機械・機器の製造

7. 低圧蒸気タービンディスク

8. 酸性平炉 3Cr-0.5Mo 鋼

9. 焼き戻し脆化

---

10. 使用

11. 運転・使用

12. 機械の運転・操縦

13. ディスクキー溝

---

14. 不良現象

15. 化学現象

16. 腐食

---

17. 破損

18. 破壊・損傷

19. 応力腐食割れ

20. 脆性破壊

21. タービン破壊(飛散)

<参考文献>

- (1) D.Kalderon, "Steam Turbine Failure at Hinkley Point 'A'," Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol.186, pp.341-377(1972).

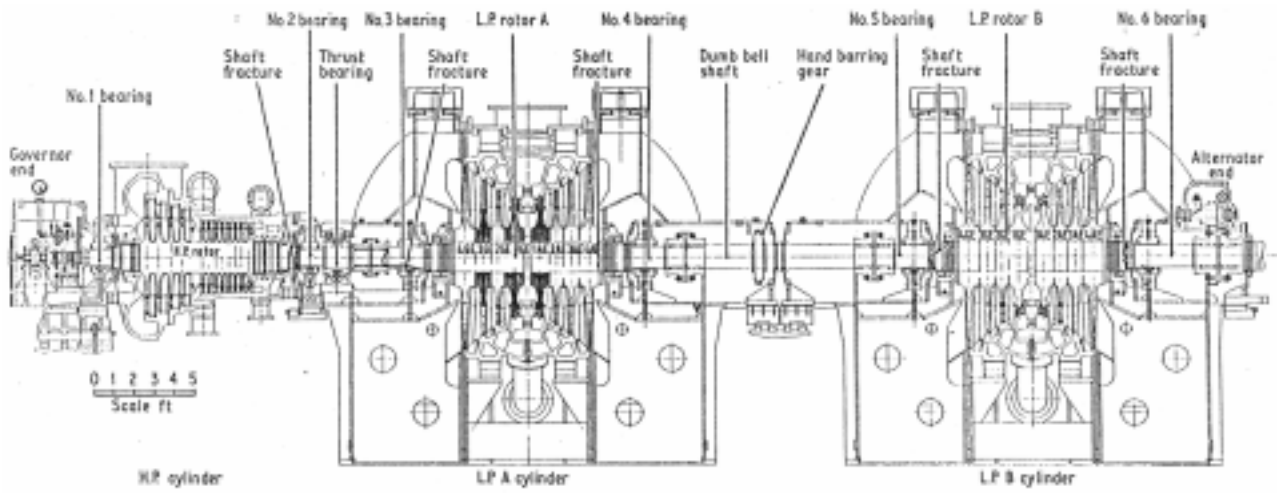


図 1 事故を起こした 5 号タービン発電機の断面図

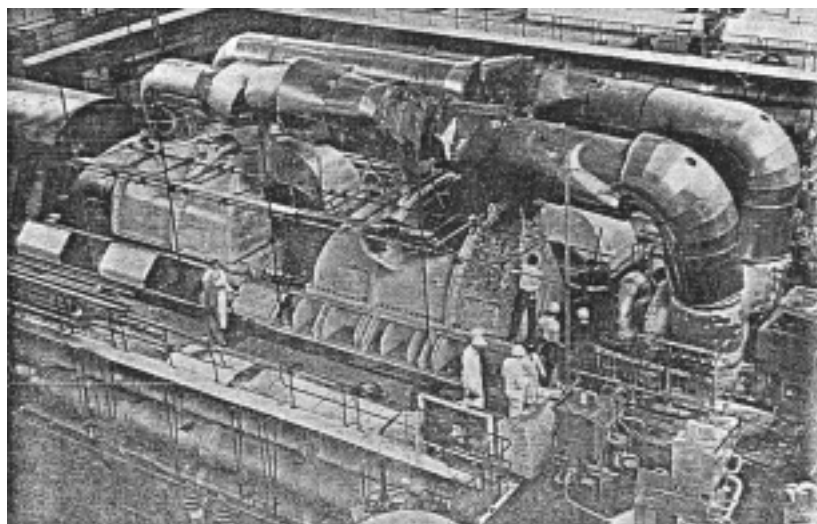


図 2 5 号タービン発電機の事故後の様相

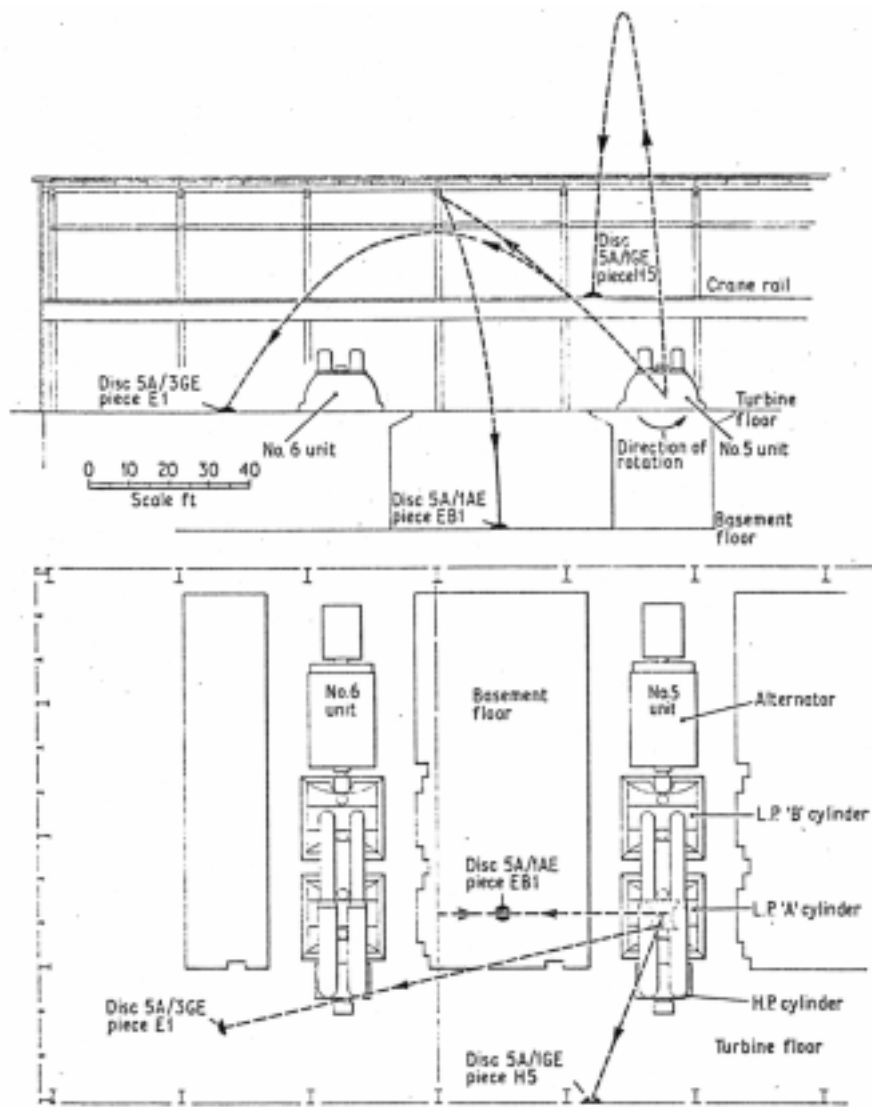


図3 3枚のディスクの飛散経路

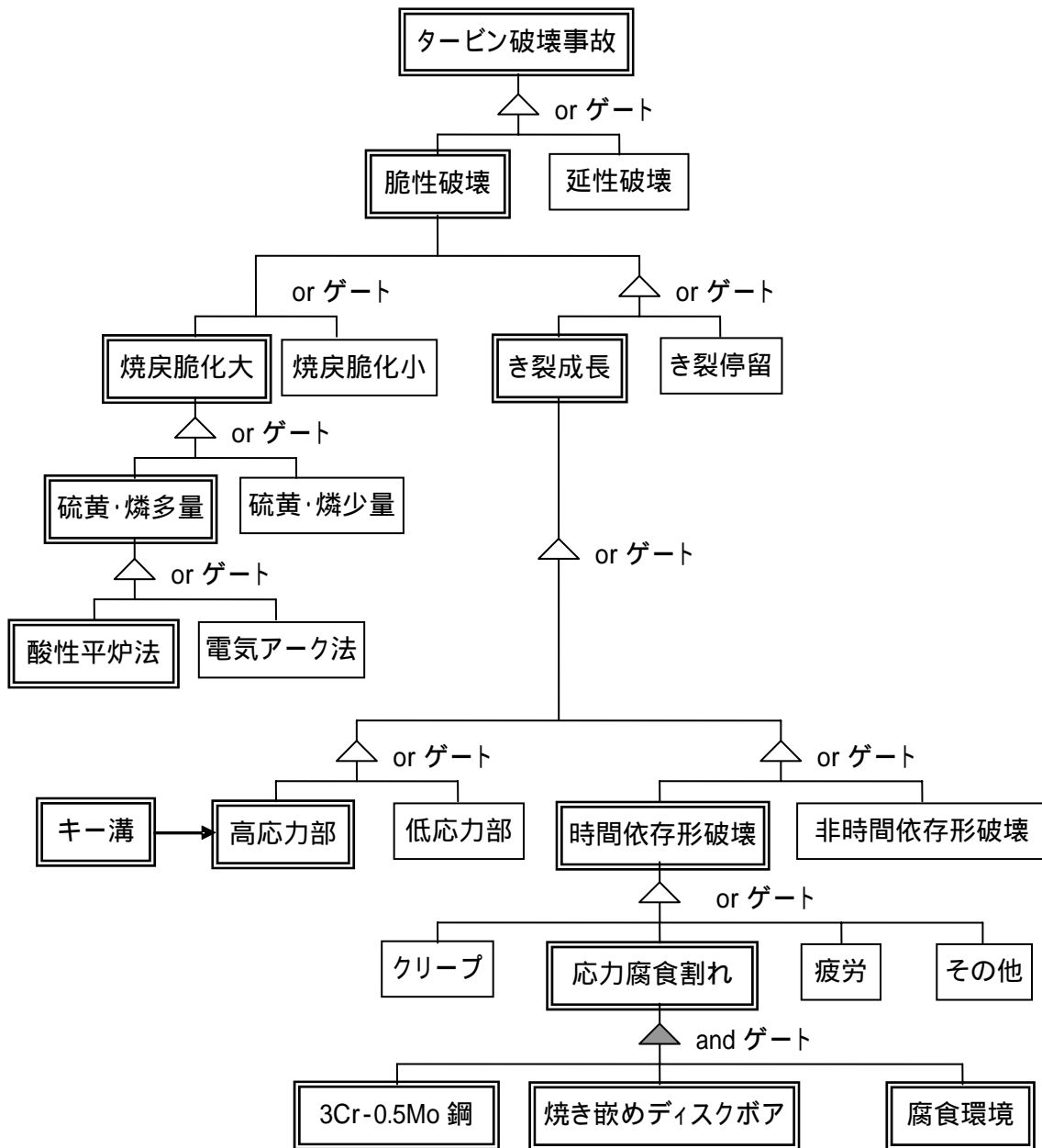


図4 破壊形態、破壊のメカニズムとプロセスに着目したフォールトツリー図

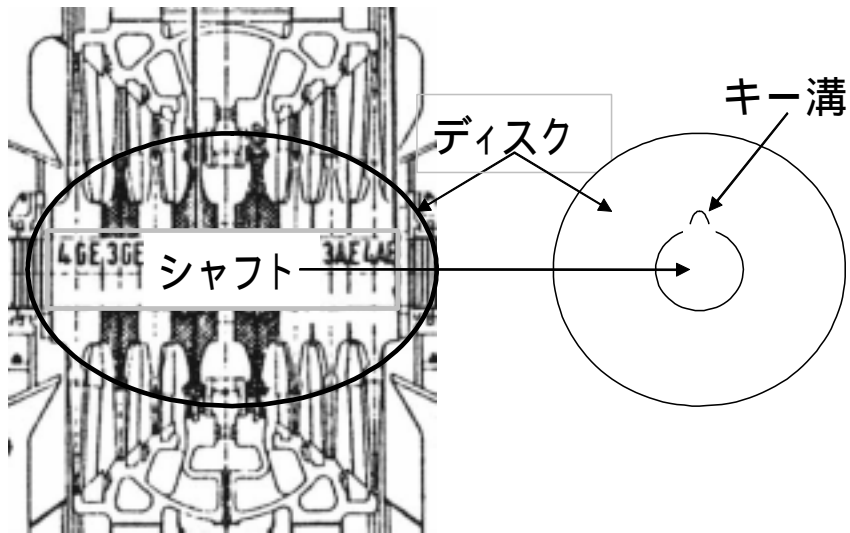


図5 シャフトに焼き嵌めされたディスクとその固定用キーの溝

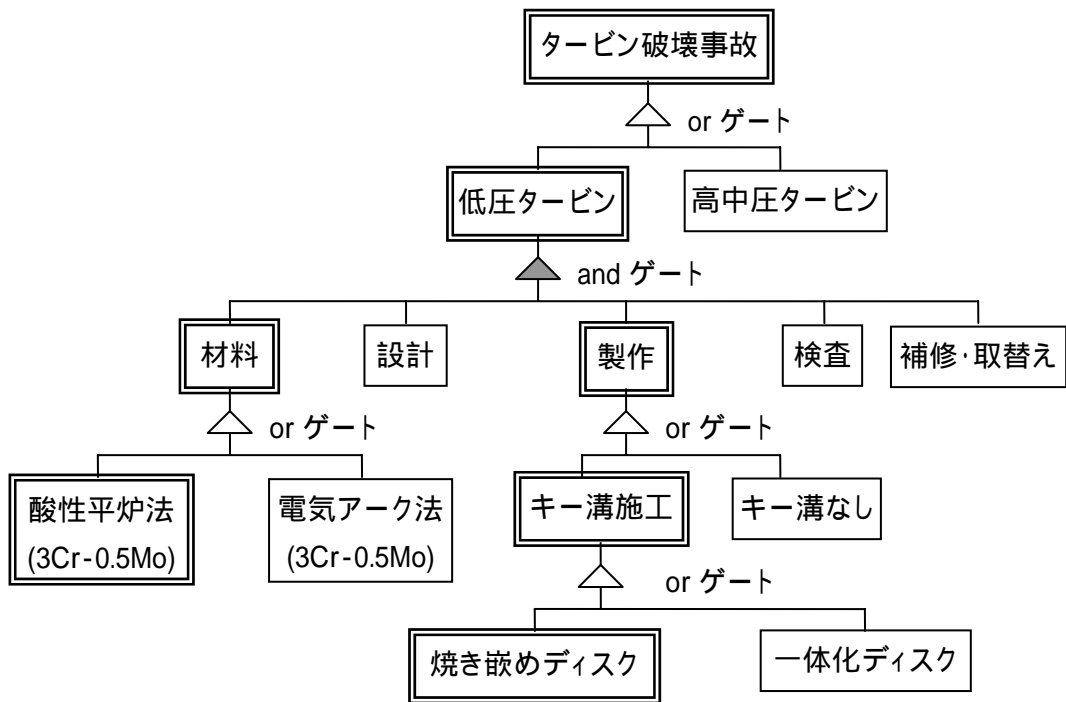


図6 機器の設計と製作における不適切・不良に着目したフォールトツリー図



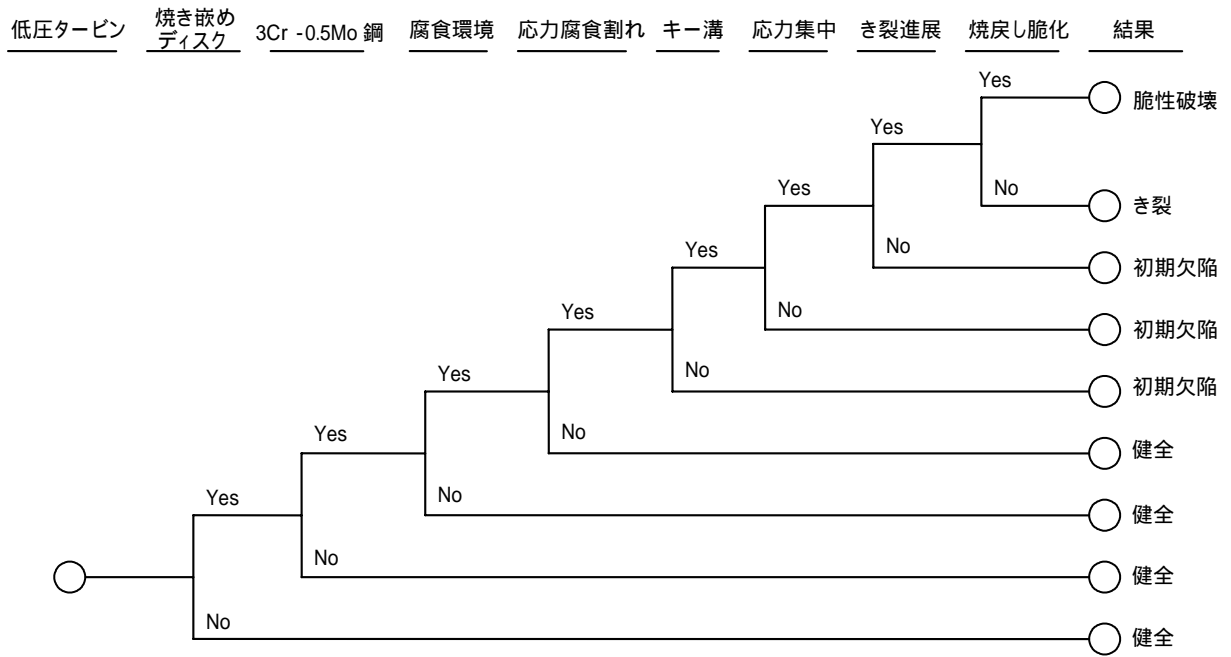


図7 応力腐食割れが生じた焼き詰めディスクのキー溝における応力集中と脆性的な材質による低圧タービンの破壊事故のイベントツリー図