

原子力発電所の事故、故障の実態

日本原子力研究所安全工学部長
村主 進

一 原子力発電の歴史

一九五四年五月ソ連のオープンクスにおいてグラファイト減速・加圧水型の原子炉で世界最初の原子力発電に成功し、英国では一九五六年五月コールダーホールでグラファイト減速・炭酸ガス冷却型原子炉で原子力発電に成功し、米国では一九五六年アルゴンヌで沸騰水型原子炉で原子力発電に成功している。米国では、その他 Shippingport (加圧水型、電気出力九万KW、一九五七年一二月初発電)、 Yankee (加圧水型、電気出力一七・五万KW、一九六〇年一月初発電)、 Drexlerfen (沸騰水型、電気出力二〇万KW、一九六〇年四月初発電) の発電所を建設し、これらは現在でも稼働しており、長年の運転経験にもとづいて各種の改良を行い、今日の軽水型原子力発電所の隆盛の基礎を形づくったものといえよ

う。

わが国においても昭和三八年一〇月、日本原子力研究所の動力試験炉 (電気出力一・二五万KW、沸騰水型) でわが国最初の原子力発電に成功し、昭和四一年七月、日本原子力発電 (株) の東海原子力発電所 (電気出力一六・六万KW、マグノックス炉) でわが国最初の営業用原子力発電を行った。その他日本原子力発電 (株) の敦賀炉、東京電力 (株) の福島一号炉、二号炉、三号炉、関西電力 (株) の美浜一号炉、二号炉、高浜一号炉、中部電力 (株) の浜岡一号炉、中国電力 (株) の島根炉が原子力発電を行っており、その設備容量は五二二万KWに達している。

国際原子力機関の調査によれば、一九七二年末において世界中で運転中の原子力発電所は一二七基であって、その発電容量は三、五二〇万KWに及ぶ。またその発電実績は八四六原子炉・年に達して

いる。その後の調査によれば、現在における運転中の原子力発電所は一五七基に達している。

二 事故、故障の定義

事故、故障について、その受けとり方が人によって異なっていると思えるので、先ず事故の定義または範囲を明らかにしたい。広義な意味の事故は次の様に分類できよう。

- ① 人に危害を与えたり、人命に影響のあるもの。
 - ② 莫大な財産上の損害を及ぼすもの。
 - ③ 異常な運転状態と表現すべきもの。
 - ④ 機器の故障の範囲に入るもの。
 - ⑤ 計画通り実施できなかつたもの。
- 例えば、機器の故障や地震などの自然現象の影響も含めて、計画通りの発電

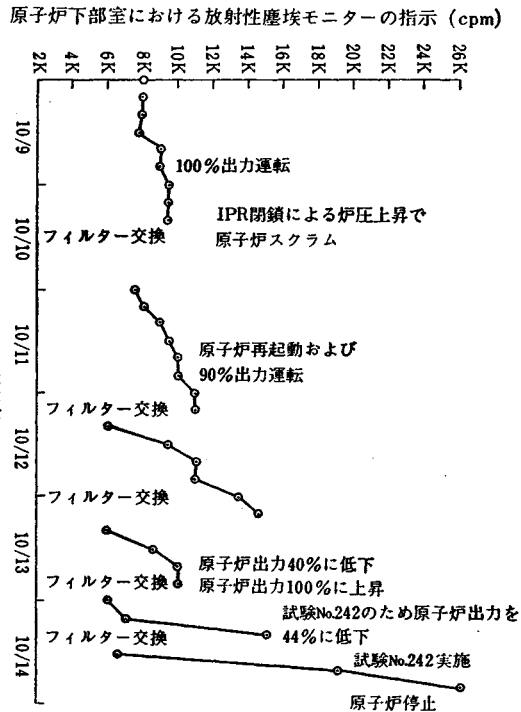
が出来なかつたものも含む。広義な意味の事故は上記の①～⑤を含めて言う場合があるが、新聞記事で取り上げている事故は①～④の範囲のものを含めていると考えられる。然しながら直接安全性について論ずる場合は①および②で定義される事故について最も重大視して言及することが必要である。このうち②の事故については、保障措置が十分講じられれば施設者側は別にして周辺住民には実害が殆ど生じないようにすることができるとができる。

一方、③および④の事故は異常運転または故障と言うべき種類のものであるが、その内容を十分検討して①および②の事故に発展しないように、設計へのフィードバック、規程類の整備および運転員の教育訓練などを行うために活用されなければならない。

三 事故、故障の発生頻度とその内容

前述の①および②のカテゴリーに入る事故は、原子力発電の初期の頃、商業用原子力発電所以外の原子炉で起こった例はある。その代表的な例は後で詳しく説明するが、ひとつは英国のウインズケールのプルトニウム生産用の原子炉の事故であり、他のひとつは米国の小型の南極駐屯部隊用の動力炉 SL-1 の事故であ

第1図 ラ・クロセBWR—原子炉運転状況と
原子炉下部室塵埃モニターの指示変化



る。これらの原子炉の事故は、現在では考えられないほど安全性について無防備の原子炉であったものである。

然しながら、原子力発電の経験は今年で満二〇年、実用規模の軽水型原子力発電所の経験がすでに一四年、運転中の原子力発電所の数が一五七基の現在において、商業用原子力発電所は前述の①および②の事故は未だ起こした事はなく、また将来にわたっても実際に起こる事はまづないと考えてよいであろう。「想定事故」として、技術的な見地からみて、最悪な場合には起こるかも知れないと考えられる事故として、最大口径の配管の破

断を想定しているが、このような事故の起こる確率は多目に見積っても一〇〇万年に一回であると言われている。

一方、前述の③、④および⑤の異常運転および故障はかなり多く発生している事は事実であり、米国の原子力委員会の発表では米国において一九七三年の一年間に合計八六一件の報告があった。この報告は米原子力委員会が国内の各原子力発電所に対して報告を義務づけ、これを集計したものである。

報告の内容は各発電所によって精粗があるが、八六一件の内訳をみると、とるに足らない事例が四七一件、重要な事例

になるおそれのあるもの三七一件、重要な事例一八件となっている。米原子力委員会の言う重要な事例とは、①技術仕様書（日本の場合、原子炉等規制法に定める保安規定がこれに相当すると考えてよい）に定める放出基準を超えて、放射性物質を敷地外へ放出した場合、②かなりな財産上の損害または人身事故があった場合、③技術仕様書に定めた安全基準を侵した場合である。

一八件の重要な事例のうち、一二件が技術仕様書に定める放出基準を超えた放射性物質を敷地外に放出した事例である。然しながら、このうち一一件は同一発電所が数日にわたって一回放出基準を超えたものを一一件として報告したもので、正確にはこの一一件は一件として数えてよいものである。いずれにしても上述の一二件は許容基準を超える放射性物質の放出を伴うものではなかった。

さて八六一件の事例を別の角度から整理すれば、機器の故障が原因であるもの四四二件、運転員（職員）の誤操作が原因であるもの一三二件、運転操作手順書の不備によるもの七一件、設計ミスによるもの五一件、雷、地震など自然現象によるプラント外の停電に起因するもの一四件、その他一七一件である。以上の事例からみて信頼性のある機器の開発のみならず、運転員の教育訓練、規程類の整備、設計の見直しが大切であるが、こ

れらは原子力発電所運転の実験経験に基づいて行わなければならないと考える。

四 原子炉一次冷却系統 配管などの亀裂

前節に事故、故障の類別頻度について述べたが、原子炉一次冷却水の放射性物質を原子炉一次系統外に漏出する原因は配管および弁のケーシングなどの貫通亀裂と弁のグランドパッキング劣化による一次冷却水の漏洩である。このうち亀裂は進展性であるので、本節ではこれについて述べる。

原子炉一次冷却系統は耐腐食性の要求される所が多いので一般にステンレススチールが炭素鋼にステンレススチールを内張りしたものを使用している。ステンレススチールの耐腐食性は良好であるが、熔接の際の入熱が適切でないと熱影響部が応力腐食割れに対して鋭敏化する。またステンレススチールそのものも応力除去熱処理が適切でないと同様に鋭敏化する。原子力発電所における一次冷却材の漏洩の原因はこの応力腐食割れ（金属内のひずみによって誘発され促進される腐食）によるものが最も多く、次に熔接不良（例えば熔接部に異物の介在または熔接の溶けこみ不良）によるものである。

右に述べたような欠陥の発生を防ぐた

第1表 19 l/minの漏洩を生ずる亀裂長さ
と限界亀裂長さの関係

| 配管径 (Sch. 80) | 平均肉厚 | l | | l/lc | |
|------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | 蒸気ライン | 水ライン | 蒸気ライン | 水ライン |
| 4B | 8.6mm | 183mm | 124mm | 0.745 | 0.510 |
| 12B | 17.4mm | 216mm | 122mm | 0.432 | 0.243 |
| 24B | 30.9mm | 218mm | 117mm | 0.247 | 0.132 |

【備考】 l: 19 l/minの漏洩を生ずる亀裂長さ
lc: 限界亀裂長さ
漏洩条件: 73.8 kg/cm² 飽和蒸気および水
材料は炭素鋼。ステンレススチールの場合は l/lc の値はさらに
低くなる

めに、最近プラントの建設に「品質保証」を厳重に行うようになった。品質保証とは、④設計の管理（設計者以外の者による最終設計のレビュー）、⑤購入材料の管理、⑥製作工程の管理、⑦貯蔵、⑧引出などの管理、⑨試験、検査の管理、⑩測定、試験機器の校正、⑪監査（品質保証計画に従ってすべてが行われているかどうかの監査）、⑫是正措置（不適合点があれば原因除去の措置をとる）、⑬記録の保存を一貫して行うことである。

然しながら品質保証を厳重に行っても

熔接も含めて数多くの工程があるので、一つのミスもないとは言えず、亀裂の発生することは考慮しなければならぬ。亀裂が発生した場合にこれを早期に見出し、貫通亀裂を生ずる以前に原子炉を停止することが必要である。このため原子力発電所の一次冷却系統のうち特に重要な系統である圧力バウンダリ（原子炉隔離弁より原子炉側の一次冷却系統）に対して、発電所の供用期間中、定期的に検査することが義務づけられている。

しかしながら供用期間中検査を行っても、検査の見落としなどによって貫通亀裂が生じて、放射能を帯びた一次冷却水が系外に漏洩することが稀にある。このための対策として早期に一次冷却水の漏洩を検出する手段が必要となる。現在一次冷却水の漏洩の検出の方法として原子炉格納容器内において、格納容器底部のサンプピットの水位上昇率の変化による方法、放射性塵埃の濃度の変化による方法、露点の変化による方法などが採用されている。これらは圧力バウンダリの何れの箇所にも亀裂を生じて一次冷却水が漏洩しても検出できるので、この方法で見落しすることはない。

次に漏洩率に関する許容量については米国では毎分一ガロン（毎分三・ハリットル）と定めており、前述の測定方法を用いれば、この許容漏洩量は測定可能である。また、この許容漏洩量は日本にお

いても準用している。一方この漏洩を生ずる亀裂の長さは配管の破断に対してどの位の余裕があるかを示したものが第1表である。表は毎分五ガロン（毎分一九ハリットル）の漏洩を生ずる亀裂の長さ、配管が急速に破断するに至る限界亀裂長さの比を示したものである。ここに二四Bとは内径がほぼ二四インチ（六一センチメートル）の配管のことである。この表からみても毎分一ガロンの漏洩を生ずる亀裂の長さが配管の破断に至るとは殆どない事がうなずけよう。

次に配管の亀裂の発生と一次冷却水の漏洩検出の実例について述べる。米国のラ・クロセ発電所で、一九六九年一〇月一〇日、初圧調整弁（IPR）が閉鎖したために原子炉圧力が上昇してスクラムした。一〇月一〇日直後の放射性塵埃モニタの指示を示すと第1図の通りである。この塵埃モニタはロ紙固定式モニタであるので、放射性塵埃が存在すると、指示が時間と共に上昇する。一〇月一日に原子炉を再起動して出力運転を再開したところ、前述のモニタの指示の異常上昇が認められた。その後原子炉の運転と共にモニタの指示の上昇率は増加している。またフィルタの分析でも一次冷却水の漏洩による放射性塵埃の増加が認められたので、一〇月一四日に原子炉を停止して点検することとした。このときの原子炉一次冷却水の漏洩率は、運転温度

圧力において毎時二ミリリットルと見積もられている。

ラ・クロセ原子力発電所で原子炉停止後点検したところ、再循環ヘッダにつながる口径四インチの給水入口ノズルのセーフエンドに円周方向の長さ三ミリメートルの貫通亀裂を確認した。原因究明の結果、このセーフエンドは製作時の応力除去熱処理の結果、ステンレススチールが鋭敏化し、このため応力腐食割れによって発生したものと判明した。

熔接の入熱が適当でないために熔接熱影響部が鋭敏化して貫通亀裂を生じた例としては、一九七二年八月のJ.P.D.R.の炉心スプレイスノズル・セーフエンドの貫通亀裂、一九七一年一月のドレステンの原子炉浄化系配管の貫通亀裂などがある。また熔接時の異物の介在、熔接の溶けこみ不良、高サイクル疲労、低サイクル疲労などによって貫通亀裂を生じている例もある。いずれの例も漏洩検出器によって発見されるか、またはそれ以前に点検によって発見されている。

五 制御棒およびその駆動機構の故障

原子力発電所の故障記録を調べてみると、制御棒およびその駆動機構の故障もかなり発生している。故障としては制御棒の挿入、引抜の動作不良、駆動機構の

損傷あるいはスクラム時間の遅延等である。これらのトラブルの原因としては、

① 駆動機構の分解作業時に発生した金属片または金属粒子のつまり、ゴミの沈着等あるいは部分品の脱落などによる駆動機構の故障

② 継電器の接点、リミットスイッチの損傷あるいは巻線の短絡等による制御回路の故障

③ 制御棒部品（ローラ等）の脱落による制御棒動作不能

④ 運転手順に従わない誤操作による損傷

などがある。これらの故障は旧式な制御棒駆動機構に多く発生しており、これらの故障の原因を調査して、新しい駆動機構の設計に反映されている。

また①については定期検査または補修後の起動前試験の時に発見されるものが多い。さらに原子炉の炉心の設計基準として、一本の制御棒が全引抜で挿入されないときでも原子炉が停止するように設計されている（Stuck Rod Margin）ので、このような故障のときでも原子炉は停止することが出来る。②については、制御回路はフェイル・セーフの設計になっているので、この様なときは原子炉に制御棒が挿入される様に設計されている。③については前述のスタック・ロッド・マージンによって、この様な故障のときでも原子炉は停止することが出来る。④

については運転員の教育訓練によって、このような事が起こらない様にしなければならない。

原子炉停止は必要な時には必ず行わなければならないので、前述のような対策の上に、さらに原子炉制御系による原子炉停止が出来ないことを想定して、中性子を吸収するボロン溶液を注入して原子炉を停止することが出来る設備を設けている。

六 その他の異常運転および故障

弁のグラインドパッキングの劣化等による一次冷却水の漏洩も非常に多い。これは著しい進展性はないので、巡回点検中に発見することが多いが、漏洩が多くなると四節で述べた漏洩検出器で検知することが出来る。

熱交換器特に蒸気発生器の細管の亀裂による一次冷却水の漏洩も多い。これは二次系の水モニタにより、漏洩が生じれば検知され、放射性物質を基準値以上に環境に放出しない対策をとることが出来る。

弁の故障として、弁が開かなかつたり、弁のシート部に溶接くずやゴミがたまって弁が完全にしまらない故障もある。また計装が故障したり、ポンプの起動失敗などの例もある。このような場合に備えて、重要な機器は定格容量のもの

を二つ以上、独立に重複して設置し、常時運転しているポンプなどは交互に運転したり、常時停止している機器は原子炉運転中に定期的な作動試験をして、独立、多重な機器が同時に故障することのない様に設計、運転管理をしている。

電源が喪失する例も多い。このため電源が喪失すれば原子炉がスクラムするように設計（フェイル・セーフ）し、また原子炉停止時でも必要な電源は電池で供給したり、非常用ディーゼル発電機で供給する。

その他燃料の破損の例もある。設計範囲の燃料破損の場合は原子炉を停止しないが、設計範囲外のものには原子炉を停止する。

七 わが国における事故の実態

以上原子力発電所の故障の内容について述べたが、その具体例としてわが国における原子力発電所における主な事故の実態を第2表に示す。この表に示す様にこれらの事故は二節の③に相当する異常な運転状態と言うべきものである。

八 ウィンズケールの原子炉事故

ウィンズケールのブルトニウム生産用原子炉は一九五〇年に作られたもので、空気冷却の天然ウラン黒鉛減速の原子炉

である。この原子炉は発電用原子炉ではないが、大きな事故を起こしたので参考のために述べる。

一九五七年一月七日より黒鉛の歪として蓄えられているウィグナー・エネルギーの放出作業を行うために、冷却用主送風機を止めた後、原子炉を超臨界にして黒鉛を加熱した。このとき黒鉛の温度の上昇が予定通り上昇しないように思えたので一月八日第二回目の超臨界によって再度加熱を試みた。この第二回目の原子力加熱があまりにも急速によって露れたので、一月九日に過熱によって露出したウランの酸化をもたらしただけである。露出したウランは九日の一日中ぐすぶり続け、一日日排気筒煙突の放射能測定器が異常な指示を示した。一日には炉心に水を注水して炉心を冷却した。

(注) ウィグナー・エネルギー—黒鉛が速中性子の照射によって格子欠陥を生じ、このため黒鉛の中に蓄積されるエネルギーを言う。黒鉛のばあい、ふつう三〇〇〜四〇〇度で加熱すればこのエネルギーは自動的に放出される。

この事故の原因は温度測定用の熱電対と、原子炉出力検出器の位置がこの作業のための正常な位置になかったためである。

この事故でI—131が二万キュリー、Cs—137が六〇〇キュリー、Sr—89が八〇キュリー、Sr—90が九キュリー放出された。一月一二日午後九

第2表 わが国における原子力発電所の主な事故例

(原子力発電便覧, p.116, p.117 引用)

| 年 | 件名 | 発生日月 | 発生場所 | ①放射線被ばく ②人的傷害 ③物的損傷 | 事故発生の原因 |
|----|-------------------------|----------------------|---|--|---|
| 38 | JPDR シール冷却系の故障 | 38. 3. 28 | 原研東海研究所 JPDR | ①, ②なし ③制御棒駆動装置の一部損傷 損害額約 11,000 千円 | 炉内圧力と制御棒シール部圧力差検出装置の故障による |
| 42 | 引火事故 | 42. 11. 18 | 原電東海発電所 | ①なし ②5名火傷, 1名死亡, 2名顔面火傷約3ヵ月, 2名軽火傷 ③不明 | No.3 熱交換器 CO ₂ 冷却機のオイルストレナーの切換ハンドル不良 |
| 42 | ガス循環機入口ベローズ損傷事故 | 42. 12. 22 | 原電東海発電所 | ①, ②なし ③ガス循環機入口インナースリーブの入口ベローズおよびマンホール整流カバープレート等の損傷 損害額 3,200 千円 | 出力 166MW で運転中 No.3 ガス循環機インペラー軸受に振動が発生したことによる |
| 43 | 2号熱交換器チューブ漏洩事故 | 43. 8. 16 | 原電東海発電所 2号熱交換器 | ①, ②なし ③不明 | 2号熱交換器チューブのエロージョン, コロージョンと推定 |
| 43 | 2号熱交換器チューブ漏洩事故 | 43. 12. 21 | 原電東海発電所 2号熱交換器低圧蒸気管出口管 | ①, ②なし ③不明 | 2号熱交換器低圧蒸気管出口管の曲管部のエロージョン, コロージョンと推定される |
| 44 | 燃料破損事故 | 44. 1. 26 | 原電東海発電所 スタンドパイプ No. 16, 50 #15 チャンネル | ①, ②なし ③不明 | |
| 44 | 4号熱交換器チューブ漏洩事故 | 44. 9. 22 | 原電東海発電所 高圧上部蒸発器 | ①, ②なし ③不良 | 4号熱交換器のチューブのエロージョン, コロージョンと推定 |
| 44 | 燃料取扱装置故障 | 44. 10. 9 | 原電東海発電所 原子炉室 | ①, ②なし ③不明 | 燃料取扱装置のチャージシュートの不良 |
| 46 | 被ばく事故 | 46. 7. 15 | 原電東海発電所 | ①作業者3名被ばく9.48, 7.87, 3.07/3ヵ月 ②, ③なし | 作業員の不慎れとエアラ・モニタの窒息現象による |
| 47 | 蒸気発生器細管漏洩事故 | 47. 6. 13 | 関電美浜発電所 1号炉 | ①, ②なし ③蒸気発生器細管1本破損 | 蒸気発生器細管の熱腐食 |
| 47 | 主変圧器短絡事故 | 47. 8. 11 | 関電美浜発電所 2号炉 | ①, ②なし ③主変圧器損傷 | 主変圧器高圧側巻線の絶縁不良 |
| 47 | 炉心スプレー系配管よりの漏水事故 | 47. 8. 17 | 原研東海研究所 JPDR | ①, ②なし ③調査中 | 熔接熱影響部の応力腐食割れ |
| 47 | 起動変圧器2次側(6.9kV)短絡事故 | 47. 12. 7 | 原電敦賀発電所 | ①, ②なし ③起動変圧器2次側母線, ダクトおよび起動変圧器用遮断器の破損 | 起動変圧器2次側母線の絶縁不良 |
| 48 | 廃液地下貯蔵設備 建家からの廃液漏洩事故 | 48. 6. 25 16'—32' | 福島原子力発電所 1号炉 | ①, ②, ③なし 放射性廃棄物のろ過脱水処理作業中処理系のドレン弁から放射性廃液が漏洩しその一部が処理室建家外にあふれた | 系統ドレン弁の縮まり不完全と床ドレンファンネルのつまり |

注) 放射線従事者の許容被ばく線量は, 全身に対する被ばくの場合は 3レム/3ヵ月。手, 前膊, 足または足関節のみに対する被ばくの場合は 20レム/3ヵ月。

時、半径三キロメートル以内の乳牛から取った牛乳の配達に制限が設けられ、一日にはその範囲が拡大され、一月二三日にこの制限が解かれた。このため周辺住民の被ばく線量は軽微で、住民の健康には影響がなかった。

ソ連の原子力発電の成功が一九五四年、米国、英国では一九五六年であるので、これからも分る様に、ウインズケールの原子炉の事故は原子力発電の極く初期に起こったものである。この原子炉は空気冷却であって、現在ではこの様な空気冷却方式は採用していかないものであるが、その他の原子炉安全技術的な点についても現在の原子炉技術より未熟であって、今日では到底このような事故は考えられない。

九 S L 1 の事故

S L 1 は飛行機で運搬することができ、小型の南極駐屯部隊用の動力炉で、熱出力三、〇〇〇キロワット、電気出力二、〇〇〇キロワット、暖房用熱源四、〇〇〇キロワットに設計された沸騰水型原子炉である。この原子炉は米国のアイダホの国立原子炉実験所で各種の試験が行われていた。

このときの S L 1 は四〇本の燃料要素と五本の制御棒で炉心を構成し、一本の制御棒を引き抜けば超臨界になるよう

なものであった。一九六〇年二月二三日に定期保守などのために原子炉を停止した。翌年一月三日は中性子束測定用ワイヤを取りつけ、翌日の運転再開のための準備をしていた。三日午後九時頃、運転員の一人が制御棒を誤って引き抜いたため原子炉が暴走したものである。そのため炉室内に居た三名の運転員が死亡した。

この事故の原因は、一つは一本の制御棒の引き抜きで原子炉が超臨界になる(すなわち、スタック・ロッド・マーキングがない)ような原子炉であった事、第二は制御棒を引き抜くときは運転制御室に運転員が居て中性子束の上昇を監視すべきところをしなかった事、第三は制御棒を引き抜くときは中性子の急上昇時にスクラムする回路を生かしておくべき事をしなかったことと言ったような今日の原子力発電所における原子炉安全性の設計基準もしくは常識を無視したことに帰因する。今日の原子力発電所では到底考えられない事である。

この原子炉の建家は気密な格納容器として設計されたものではなかったが、この事故による放射性物質の放出はごくわずかであって、救出および復旧作業に従事した人は別として、人畜への被害はなかった。

一〇 むすび

以上原子力発電所の事故、故障の実態について述べた。これらはすべて二節の定義の③、④、⑤のカテゴリには入るものばかりであるが、将来とも①、②のカテゴリの事故の絶無を期するためには、異常運転または故障の内容およびその原因を十分検討して、原子炉の設計、建設および運転管理に反映することが必要である。

また機械的な面のみならず、運転員の教育訓練および運転操作要領など規程類の整備にもこれらの検討結果を反映せしめる事を望むものである。

〔参考文献〕

- (1) 原子力発電便覧(七四年版) 電力新報社
- (2) D. Thompson et al.: Summary of Abnormal Occurrences Reported to the Atomic Energy Commission during 1973. OOE-OS-001 (may 1974)
- (3) Docket 1155-14-29
- (4) 大西武他・原子力施設の事故 JAE RI 4052

(すべり・すずむ)

ジュリスト300号記念特集

学 説 展 望

— 法律学の争点 —

□法律学の各分野において何が問題となっているか、そこでの学説の対立、判例と学説の抗争を明らかにし、その対立の実質的根拠と、その対立の実際的な意義を示す。

□とりあげる項目数は192に及び、それぞれの項目を斯界第一線の学者が分担執筆したわが国初の大特集。

□定価900円 B 5判424頁 有斐閣