



原子力緊急時の住民避難計画の策定に関する調査(II)

—フランスの即時対応と避難、及び避難時間評価に関する各種モデルの実例調査—

Research on Evacuation Planning as Nuclear Emergency Preparedness(Ⅱ)

-Reflex Action Phase and Evacuation in France
and Examples of Evacuation Time Estimation Models-

山本 一也

Kazuya YAMAMOTO

原子力緊急時支援・研修センター

Nuclear Emergency Assistance and Training Center

June 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

原子力緊急時の住民避難計画の策定に関する調査（Ⅱ）
ーフランスの即時対応と避難，及び避難時間評価に関する各種モデルの実例調査ー

日本原子力研究開発機構 原子力緊急時支援・研修センター
山本 一也

(2008年 3月 31日受理)

原子力緊急時の住民避難計画の策定に関して，以下の2点について公開文献を中心とした調査を実施した。

- ① フランスにおける即時対応と避難の方法
- ② 避難時間評価に用いる各種評価モデルに関する実例調査

フランスで導入された即時対応フェーズは，早い放射性物質の外部放出が予想される事故に対処するため，まず半径 **2km** の範囲について即時に屋内退避を実施し，その後，放射性プルームの通過を待って避難を実施するという対応がなされる。また，この対応には，当該区域に対して安定ヨウ素剤の事前配布を実施することが前提となる。

フランスの原子力緊急時の住民避難は，我が国と同様にバスで避難者を移送するが，その受入れ施設は，屋内退避措置が想定されている範囲，原子力発電所の場合 **10km**，の外に設置される。

避難時間評価に関する米国の実例から，避難時間評価は，外的条件のパラメータとして，季節，平日／週末，昼／夜，天候，行事等を設定し，あらかじめ作成した避難区域パターンについて実施される。国勢調査データでは分からない住民行動に関する情報は電話調査によって取得している。避難時間評価において，避難対象になっていない住民が自発的に避難をはじめてしまうことの影響は重要である。また，我が国においては，一般道に関する広域の交通シミュレーション技術が重要である。

Research on Evacuation Planning as Nuclear Emergency Preparedness (II)
—Reflex Action Phase and Evacuation in France and Examples of Evacuation Time Estimation Models—

Kazuya YAMAMOTO

Nuclear Emergency Assistance and Training Center
Japan Atomic Energy Agency
Hitachinaka-shi, Ibaraki-ken

(Received March 31, 2008)

Open literature based research about evacuation planning and the preparedness for nuclear emergency was performed, focusing on the following issues;

- a) Reflex action phase and evacuation in France,
- b) Research on analytical models and database of evacuation time estimation (ETE) by practical examples in U.S.

Reflex action phase introduced in France is a prompt shelter-in-place is requested in the case of accidents liable to cause radioactive release within a short period. Subsequent evacuation is conducted after the passage of the radioactive plume. Pre-distribution of stable iodine tablets to the populations living in this area is required to this prompt sheltering.

In the case of evacuation at nuclear emergency, evacuees are transported to public reception centers by buses in France, as same as in Japan. The public reception center is selected from facilities where are outside of the sheltering area, that is, the area outside 10km radius in the case of nuclear power plant accident.

According to examples of ETE report for commercial nuclear power plant licensing in U.S., ETE have to be conduct for external conditions, season, day of week, time of day, Weather(Good, Rain, Snow), and special or annual main events. ETE should be done to pre-defined evacuation regions. A telephone survey of residents within the EPZ is conducted to gather focused data needed for ETE study that were not contained within the census database. It is very important for ETE to consider a portion of the population outside the impacted region will elect to voluntary evacuate, so called, “voluntarily evacuation” or “shadow evacuation”. Furthermore, traffic simulation technology development for large scale road network composed of main and small roads, is very important in Japan.

Keywords: Nuclear Emergency Preparedness, Nuclear Emergency Response, Evacuation, Sheltering, Reflex Action Phase, Evacuation Time Estimation

目 次

1. はじめに	1
2. 原子力緊急事態におけるフランスの“即時対応”と住民避難の方法	3
2.1 フランスのオフサイト緊急時計画	3
2.2 即時対応フェーズにおける屋内退避の問題点	7
2.3 フランスの原子力災害時における住民避難の方法	9
2.4 フランスの緊急時計画から見た日本の原子力防災計画	13
3. 原子力緊急時の住民避難における米国の避難時間評価	18
3.1 原子力発電所の避難時間評価レポート	19
3.2 KLD 社の避難時間評価	20
4. 原子力緊急時の“即時対応”に係る住民避難計画策定上の課題	40
4.1 我が国における防災対策の観点からの PSA 研究の必要性	40
4.2 避難時間評価における留意事項	42
5. まとめ	47
謝辞	49
引用・参考文献	50

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Prompt response and evacuation against a nuclear emergency in France	3
2.1 Off-site response plan in France	3
2.2 Issues about sheltering in reflex action phase	7
2.3 Method of evacuation in a nuclear emergency in France	9
2.4 Some issues on the Japanese nuclear emergency plan in the view of the French emergency plan	13
3. Evacuation time estimation of U.S. for nuclear emergency plan	18
3.1 Examples of Evacuation time estimation	19
3.2 Evacuation time estimation Reports by KLD, Inc.	20
4. Some issues on evacuation planning relating to prompt response in nuclear emergency	40
4.1 Importance of PSA study in Japan in aspects of nuclear disaster prevention measures	40
4.2 Attention to evacuation time estimation	42
5. Summary	47
Acknowledgements	49
References	50

1. はじめに

我が国では、原子力災害発生時における住民避難は市町村が実施するため、地域の具体的な住民避難計画あるいは退避等措置計画は市町村が策定することとなっている。実際には、県レベルで原子力災害避難基本計画あるいは退避等措置計画要綱を作成し、各市町村もしくは北海道のように地元の原子力防災会議協議会が具体的な避難計画あるいは退避等措置計画やデータベースとなる資料編を作成している例が多い。その中には、新潟県柏崎市のように、避難訓練等の経験を基に避難時間の評価を行い、原子力災害時避難誘導マニュアルを作成している地方公共団体も存在している¹⁾。

国際原子力機関（International Atomic Energy Agency；以下、「IAEA」という。）の「原子力又は放射線緊急事態に対する準備と対応に関する安全要件」（GS-R-2）²⁾において、放射線による確定的影響のリスクを低減するため、施設状況及び緊急事態に応じて予防的な防護対策を講じることができるように整備しておくべき区域（予防的活動範囲 precautionary action zone；以下、IAEA 安全要件に従い、「PAZ」という。）という概念が、原子力防災における準備の整備として導入された。

この IAEA の PAZ が最も重要な意味を持つのは原子力施設における原子力緊急事態に対してであり、防災のための対応や準備の実践的な側面において最も重要な点は、特に原子力発電所や再処理施設のように大きなインベントリを有する施設において、必要とする住民の防護対策を“即時”に実施できることを要求している点であろう。

筆者は、前回に実施した調査（以下、「前回調査」という。）の報告書³⁾において、この IAEA の PAZ 概念の導入における本質的な課題は、その地理的な範囲より、むしろその対策を“即時”に実施できなければならない”というところにあることを指摘した。また、“即時”という要求に関して、米国が導入している“即時避難”を紹介し、計画段階における避難時間評価（Evacuation Time Estimation；以下、「ETE」という。）の必要性と課題について指摘した。

しかし、欧州においては、フランスやベルギーが即時対応フェーズ（phase réflexe）という概念を導入しているものの、それがただちに“即時避難”を意味しているわけではない。前回調査においては、即時対応フェーズでは屋内退避により危機を一時回避し、その後避難を実施するという措置を取ることを示唆する文献を入手していたが^{4,5)}、その具体的な方法と考え方については明らかではなかった。

一方、特に時間がクリティカルとなるような事態の下での避難において、その実施の可否判断で最も重要な判断要素である“避難に要する時間”についても、米国の原子力規制委員会（U.S. Nuclear Regulatory Commission；以下、「NRC」という。）が発行した最も基本的な規準書 NUREG-0654⁶⁾ で示された考え方、及び KLD アソシエーツ社（KLD Associates；以下「KLD 社」という。）の Goldblatt らが実施した新しい ETE 手法⁷⁾ について概要を把握することはできたが、そこで用いられた計算方法や避難プロセスを構成す

るいくつかの評価要素に関するデータの整備方法等具体的な点については明らかではなかった。

本調査は、上述したような前回調査において残った課題，すなわち避難に依らない“即時対応”の実態，及び ETE の計算過程に使用されるモデルやデータベース等解析評価の実態について，フランス及び米国の文献に基づき調査し，IAEA の PAZ の導入を我が国で想定した場合の避難計画策定の方法と準備について検討したものである。

2. 原子力緊急事態におけるフランスの“即時対応”と住民避難の方法

前回調査の報告書において，“即時避難”によらない“即時対応”をフランスやベルギーといった欧州の一部の国で既に導入していることに言及した³⁾。本章では，フランスの原子力緊急事態における“即時対応”と避難の方法について述べる。

2.1 フランスのオフサイト緊急時計画

フランスのオフサイトの緊急時計画は，「特定介入計画」（PPI ; Plans particuliers d'intervention, 以下，「PPI」という。）*と称され，化学プラントや原子力発電所など，事故の発生にともなって外部影響が発生するような施設に対して，各県の知事が制定する *Particulier*，すなわち「固有の」あるいは「特有の」，とされているのはさまざまな施設ごとに定められるからである。以降，特に断らない限り，ここでは原子力発電所の PPI に限って述べることとする。

フランスでは，即時対応フェーズ（*phase réflexe*）に関する検討を 1997 年から 2000 年かけて実施した。“2000 年 3 月 10 日の省間通達”（*Circulaire interministérielle du 10 mars 2000*）⁸⁾の中で，従来の PPI は，当該発電所において，24 時間以上の時間余裕があるが非常に大きな放射性物質の外部放出があるような重大な事故を想定していたが，今後は重大な事故に関する報告から，速く進展するが非常に小さな影響に止まるような事故事象の解析についても同様に実施することを推奨するとして，即時対応フェーズの導入を説明している。その後，2002 年までの間に各地の PPI のこの省間通達に沿った改訂がなされ，2003 年から運用されるようになった⁹⁾。

この省間通達では，“速い進展”や“小さな影響範囲”について具体的な記載はない。しかし，原子力安全規制機関（*Autorité de sûreté nucléaire*，当時は原子力安全当局，以下，「ASN」という。）の 2000 年年報の第 7 章 4.2 項「原子力サイトのオフサイト緊急時計画の改訂」の中に，“6 時間以内にオフサイトに対する対応レベルを超えてしまうような放射性物質の外部放出”が起こるような事故事象において，“事前に決定された活動を即時実施する”と記載されている⁹⁾。サンローラン・デゾー（*Saint-Laurent des Eaux*）原子力発電所の PPI には，最も起こり得る仮想事故はゆっくりとした事象であるが，いくつかの偶然が重なる事象では放射性物質の放出がより早く起こり得ることが当時の原子力防護安全研究所（*IPSN ; Institut de protection et de sûreté nucléaire*）**の研究で示され，フランス電力公社（*EDF ; Électricité de France*）が該当事象を特定し，ASN がそれに承認を与えたという経緯が記載されている¹⁰⁾。また，この PPI には，以下の 5 事象

* PPI を「特別介入計画」と和訳する文献もある。

** 2002 年に電離放射線防護局（*OPRI ; Office de protection contre les rayonnements ionisants*）と統合され，現在は放射線防護原子力安全研究所（*IRSN ; Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire*）となっている。

が即時対応フェーズ発動のクライテリアとして記載されている。

- 安全注入系が作動しない一時系破断事故
- 残留熱除去の完全喪失
- 蒸気発生器配管の破裂
- 原子炉建屋への航空機落下
- 排気筒で 210 Bq/m³ を越える放射能を検出したとき。

このサンローラン・デゾー原子力発電所の PPI¹⁰、及びボルドーで有名なジロンド (Gironde) 県があるアキテーヌ (Aquitaine) 州のホームページで公開されているルブレイエ (Blayais) 原子力発電所*に係わる PPI 概要¹¹を基に、フランスのオフサイトにおける緊急時対応をまとめると、以下のようなになる。

フランスの防災対応の指揮組織は常に単一である。すなわち、災害発生初期は県消防本部長が指揮を執るが、県知事が対策本部を設置した以降は、県知事が指揮を執り、消防や憲兵(警察)をはじめ、国からの派遣者及び軍所属の者を含めすべて県知事の指揮下に入る。

原子力発電所において異常が発生した場合、対応は以下の 3 つのフェーズに分けられる。

(1) 警戒フェーズ (phase de veille)

veille (前夜) という表現の通り、直ちに PPI の発動を必要としないトラブル事象に対応するフェーズであり、警戒段階に相当する。

ただし、この段階でも公衆は恐れを感じるので、迅速な広報と応急対策を実施している。また、警戒フェーズでも、被ばくリスク上の判断によっては PPI を発動する場合があるとしている。

(2) 即時対応フェーズ (phase réflexe)

事業者からの事故発生の通報を受けると、まず、PPI を緊急発動するか、それとも国の専門家による評価センターからの助言を受けた上で講ずべき防護措置の性質と規模を評価し対応するかで判断が分かれる。この 2 つの判断の分かれ目は、事故進展の速さであり、それに対応したプラント状況の分類である。

事故発生から 6 時間未満 のうちに放射性物質放出の危険性があるプラント状態であれば、県知事は現地で、ASN を通してプラントの状態を評価し、健康への影響を予測することができる国の専門家による助言を受ける余裕はない。そのため、講ずべき防護措置の性質と規模を評価することは困難である。この場合、県知事はただちに PPI を緊急発動しなければならない。これが即時対応フェーズである。

もし、プラントが、放射性物質の放出が 6 時間以後 と予測されるような状態であれば、協調対応フェーズとしての対応が実施される (後述参照)。

国の専門家による評価センターが危険の性質と重大性を判定できるのは、PPI 発

*Blayais の原子力発電所 CNPE du Blayais だけは、日本語のカタカナ表記する際も、CNPE du Blayais の冠詞 le を付けて「ルブレイエ」とするケースが多いため、ここでもその習慣に従う。

動の約3時間後であるとされている。県知事はこの時点でASNから助言と勧告を得られるようになる。したがって、県知事がこの助言と勧告を受取った以降は、事故進展が遅い場合の手順と同じとなり、危機管理上からは後述の協調対応フェーズに移行することとなる。このようなことから、即時対応フェーズとしての活動は約3時間続くとされている。県知事は、この時間内に住民の退避とPPI組織の設置をしなければならない。

この即時対応フェーズは、文字通り“反射的 (réflexe)”に住民の防護対策を実施しなければならない。この緊急の防護対策は、屋内退避である。住民への警報の伝達は主にサイレンが用いられ、特別な吹鳴パターンが決められている。そのほか、全国警報信号システムによるメッセージ及び広報車が用いられる、警報を受けたら、周辺の住民は、「最寄りの建物」あるいは「自宅」に逃げ込み、戸や窓を閉め、空気取り入れ口をふさがずに換気扇のスイッチを切るとされている。そして、ラジオ等によって当局からの広報情報を傍受していなければならない。すなわち、このフェーズにおける屋内退避の目的は2つあり、まず放出された放射性物質の吸入を少なくすること、そしてラジオやテレビによって県知事の次なる指示を聞けるようにしておくことである。

PPIには退避すべき「屋内」の基準は明確に記載されていない。サンローラン・デゾー原子力発電所のPPIだけは、「堅牢な」建物(bâtiment en dur)という記載があり、屋内退避によって内部被ばくは2分の1に、外部被ばくは8分の1から10分の1に減少すると見込まれるとしている。したがって、これはコンクリート屋内退避に相当する施設を要求しているものと考えることができ、屋内退避に対して外部被ばくの低減についても見込んでいることが分かる¹⁰⁾。しかし、他の文献で屋内退避について特に「堅牢」という条件を付けた例はなく、「最寄りの建物」、あるいは、単に「建物」となっている。即時対応フェーズが導入される以前の1992年版のラ・アグ(la Hague)の再処理施設に関するラ・マンシュ県のPPIでは¹³⁾、「自宅への屋内退避」という記載がある。

今回調査で入手できた文献の範囲内では、サンローラン・デゾー原子力発電所のPPIを除くとフランスにおける即時対応フェーズ導入以降のPPIはすべて一般向けのパンフレットであり、詳細は確認することができない。そのため現時点では、フランスで即時対応フェーズ導入時に屋内退避に関して「堅牢な」建物という条件を付加した可能性を否定することはできない。しかし、我が国の地域防災計画のコンクリート屋内退避施設のように、屋内退避に供することができる「堅牢な」建物のリストは、サンローラン・デゾー原子力発電所のPPIには添付されておらず、あるいは、我が国や米国と異なり、フランスの住宅や居住区がレンガや石で作られていることが多いという地域的な事情の違いを反映している可能性もある。

IAEAの安全規準(GS-G-2.1)¹⁴⁾や米国環境保護庁(EPA; Environmental

Protection Agency, 以下, 「EPA」という。)の規準¹⁵⁾, あるいは欧州委員会の原子力事故に対する緊急時計画立案と対応に係るマニュアル(教育資料)¹⁶⁾等ではいずれも, 屋内退避に関しては, 「堅牢な」建物であれば外部被ばく及び「吸入」による内部被ばくの両方の低減効果が期待できるが, 木造建築物では, 大型施設でない限り, 外部被ばくの低減はほとんど期待できないと述べている。しかし, それでもこれらの規準やマニュアルに必ずしも「堅牢な」建物に屋内退避しなければならないと記載はなく, むしろ屋内退避による「吸入」の防止の重要性を中心にした記載になっている。欧米では, 屋内退避でコンクリート製あるいは「堅牢な」建物を退避施設の条件としている例はほとんどなく, 外部被ばくの低減を考慮しなければならないケースでは避難を優先的に考えるという文献が多い。

即時対応フェーズは, 当該発電所の半径 2km 以内に適用される。その範囲内に重大な結果が及ぶかどうかに関らず, あらかじめ決められた状況(プラントの状態)であればすべて先験的に適用され, この範囲内全域に対して屋内退避としなければならないとされている。PPI では, この即時対応フェーズに対応した半径 2km 以内の区域を「直ちに危険となる区域(Périmètre de danger immédiat)」という表記の仕方をしている¹⁰⁾。

(3) 協調対応フェーズ (phase concertée)

一般に原子力発電所における大きな事故の進展は遅い可能性のほうが高い。協調対応フェーズは, 上述の即時対応フェーズに対して, 進展の遅い事故, すなわち放射性物質の放出が 6 時間以後, と予測されるような事故, あるいは即時対応フェーズ実施後の対応フェーズである。協調対応フェーズに関しては, 当該発電所の半径 5 km 以内については避難, 10km 以内については屋内退避をそれぞれ約 24 時間以内に実施できるように平常時から必要な手段を講じておくこととなっている*。PPI では, 半径 5 km 以内を「狭域区(Petit périmètre)」, 10km 以内を「広域区(Grand périmètre)」と表記している¹⁰⁾。

実際の事故発生時に, この避難あるいは屋内退避は, 必ずしも狭域区あるいは広域区の全域に渡って, または全方位に渡って実施されるわけではない。PPI に, 適切な角度を持った範囲(セクター)で実施するという記載があり¹¹⁾, またフランスでは, 3 頁の脚注に記した IRSN が放射性物質の環境拡散予測解析を Kr X コードを用いて実施していることから¹²⁾, 実際には風下方向の必要な範囲について実施するものと考えられる。また PPI には, 半径 5 km 以内の区域であっても, 事故の状況によって屋内退避で済ませる場合もあるとの記載もある。しかし, 逆に技術的な観点から, 突発的に発生する可能性がある多様な状況を考慮し, 狭域区(5 km 圏)あるいは広域区(10km 圏)の外側の地域に対しても, 人々の防護対策の準備を考慮することもある

*再処理施設については, 避難は半径 2 km 以内, 屋内退避は 5km 以内となっている。¹³⁾

と記されている¹¹⁾。

なお、屋内退避については、許容時間を48時間程度と制限しており、それ以後は、事態の収拾により退避措置が解除されるか、避難が決定されるとしている。これは、IAEAの安全要件の付録3²⁾や安全規準(GS-G-2.1)¹⁴⁾、EPAの規準¹⁵⁾で、屋内退避は2日間を限度とするという規定と一致している。ただし、サンローラン・デズー原子力発電所のPPIには、学校に対する屋内退避については、48時間はとても持たないであろうと注意しており、学校に対しては早めに避難を考えるよう促している¹⁰⁾。

2.2 即時対応フェーズにおける屋内退避の問題点

フランスが即時対応において、米国のように“即時避難”を取らず、屋内退避とした理由や経緯は不明である。これについて記載した文献は本調査では入手できなかったためである。しかし、いくつか理由を推測することはできる。すなわち、

- ① 即時対応フェーズに相当する事象では、6時間以内という比較的早い放射性物質放出の可能性はあっても、その放出継続期間が長時間に及ぶことはないという見解がある、
- ② そのような早い放出の可能性に対して、半径2km以内全域の避難は困難という判断がある、
- ③ ①及び②の両方、

である。また、あるいは、我が国や米国と異なり、欧州の住宅や居住区がレンガや石で作られていることが多いという地域的な事情の違いを反映している可能性もある。

前回調査の報告書³⁾において述べた米国原子力エネルギー協会(Nuclear Energy Institute, 以下「NEI」という。)のガイダンスは、屋内退避は放射性物質の放出継続期間が短いという確証があるときに限り行うものとしている^{17,18)}。また、欧米では、屋内退避はあくまでも一時的な防護対策にすぎないという見方があり、第一義の防護対策である避難に対する補助的な位置付けとしている例がある^{15,16)}。すなわち、放射性物質の放出開始前に避難を実施することが第一であり、放出開始前に避難が不可能な場合に限り、屋内退避および安定ヨウ素剤の投与で一時的に対処し、放射性プルームの通過を待ってから、直ちに避難を実施するという考え方である。

したがって、フランスの即時対応フェーズは、即時対応を必要とするような事象では、放射性物質の放出は早くても、早期(48時間以内)に復旧作業が完了できることが期待できるという前提があり、その放出継続期間は長時間に及ぶことはなく、まず放出された放射性物質の吸入を避け、放射性プルームの通過を待って避難を実施することが十分可能である(すなわち、住民が外に出て移動しても健康に影響がないほどに、放射性プルームの通過後の土壤汚染が十分低い)という見通しを持って導入されたものと推測される。

米国の“即時避難”だけに限らず、フランスの即時対応フェーズの考え方も、前回調査の報告書³⁾において述べたIAEA安全要件(GS-R-2)で導入された「放射線による確定的

影響のリスクを低減するため、放射性物質の外部放出前あるいは放出の直後に予防的な防護対策を講じる」という PAZ 概念のベースのひとつになっているものと考えられる²⁾。

即時対応の防護対策として、“即時避難”あるいは“即時屋内退避”のいずれを取るにしても、そのベースとなるのは、上述したようにオフサイトに影響を及ぼす可能性のある事故における、放射性物質の放出開始の早さと規模に係る評価である。この問題に関しては第4章で述べることとする。

なお、PPI には、「まず屋内退避措置によって住民を指示待ち状態にした上で、避難命令を発するのが望ましい」という記載があり、フランスの導入した即時対応フェーズは、地域レベルでの避難実施のための準備活動期間という側面もあるものと考えられる。

屋内退避についてももうひとつ重要な問題がある。それは安定ヨウ素剤投与の問題である。

フランスの安定ヨウ素剤投与は甲状腺の予測等価線量 100 mSv を目安としている。県知事は電離放射線防護局 (OPRI, 現在は放射線防護原子力安全研究所 IRSN である。3 頁の脚注参照) からの助言を受け、安定ヨウ素剤の服用を勧告する。

安定ヨウ素剤はできれば吸入前、吸入後であれば2時間以内に服用が望ましいとされている。すなわち、安定ヨウ素剤の服用によって放射性ヨウ素の甲状腺への取込みを効果的にブロックできるのは、吸入後 1~2 時間の間である¹⁵⁾。そのため、安定ヨウ素剤の服用は、なるべく早い段階に実施しなければ効果が低下してしまう。

1992 年版のラ・アークの再処理施設に関する PPI では¹³⁾、施設外に影響が及ぶ可能性のある事故に対する対応レベル 3 (N3) で自宅退避区域の住民に安定ヨウ素錠剤を配給するとしており、事前に安定ヨウ素剤が配布されるとはなっていない。しかし、フランスでは、訓練による試行の結果、緊急時に配給しようとしても配布が間に合わないことが判明し、1996 年に広域区 (半径 10 km 圏内) に居住する住民について、事前に安定ヨウ素剤を配給することとなった。この当時の指示は、広域区に居住する住民が自ら薬局で安定ヨウ素剤を入手するというものであった。

しかし、実際には、薬局まで錠剤を取りに行かない、一時滞在者や新しく引っ越してきたなどの理由でこの措置について知らない、あるいは知っていても錠剤を手に入れられない者があり、この予防措置でカバーできるのは対象住民全体の 60%程度と見られ、追加配給を行わなければならないのが現状であったとサンローラン・デゾー原子力発電所の PPI には記されている¹⁰⁾。また、そのような状況のため、2001 年の省間通達により、狭域区 (半径 5 km 圏内) は救急要員や保健職員などが安定ヨウ素剤を各家庭に配布することが決定され、より確実に住民が入手するよう、事前配布の方法を改めた。また、広域区については、役場と薬局で引換券が配られることとなった。さらに、安定ヨウ素剤を入手していない住民のために、放射性物質放出の危険が明らかになった時点で、各コミューン(後述参照)の長が指定した配給場所で安定ヨウ素剤の追加配給が、屋内退避が実施される前までに行われる。

学校については、当局からの指示に基づき、校長の責任の下で教職員が安定ヨウ素剤を

配給する。老人ホーム、病院、ホテルおよびキャンプ場には収容人数に応じた数の錠剤が常備されている。

上述したサンローラン・デゾー原子力発電所の PPI には、ヨウ素剤の追加配給は退避時間を避けて行うこととされ、この理由として、住民に屋内に退避するよう指示しておきながら、安定ヨウ素剤を取りに来させるのは矛盾であり、また市職員や救急職員に配布させると、彼らが不必要に被ばくする危険性があるからとしている。このことから、フランスでは、即時対応フェーズで屋内退避の対象となる「直ちに危険となる区域」（半径 2km 圏内）を含む狭域区（半径 5 km 圏内）の住民に対して安定ヨウ素剤を“事前に”配布することは、本質的に重要な意味を持っている。

前述のように、安定ヨウ素剤の服用は、放射性ヨウ素の吸入前あるいは吸入後の早い段階に実施しなければ効果が低下してしまう。我が国においても、即時対応として屋内退避の措置をとる場合、前提として「直ちに危険となる区域」の住民への安定ヨウ素剤の事前配布とその服用方法及び注意点に関する確実な指示伝達が不可欠である。これが困難な場合は、米国のように“即時避難”の措置をとる必要があると思われる。

2.3 フランスの原子力災害時における住民避難の方法

前回調査では、米国の原子力災害時の住民避難について、その方法や平常時における住民への周知方法について調査した³⁾。ここでは、“即時避難”を前提としていない、フランスにおける住民避難について述べる。

フランスの原子力災害に係る PPI では、住民避難は、協調対応フェーズにおいて当該発電所の半径 5 km 以内について実施される。協調対応フェーズは、事故進展がゆっくりしている事象であると判断されるケース、または即時対応フェーズ後の対応フェーズとして発動される。ここでは、プラントの状態や事故進展予測、環境放射線モニタリング及び放射性物質の環境拡散予測解析等に基づいて避難の実施とその範囲が決定される。

1992 年版のラ・アークの再処理施設に関するラ・マンシュ県の PPI では¹³⁾、住民避難は、施設外に影響が及ぶ可能性のある事故に対する対応レベル 3 (N3) で実施される(実施範囲は、施設周辺半径 2 km 以内である)。ただし、このラ・マンシュ県の PPI は、フランスで即時対応フェーズが導入される以前の PPI であることに注意が必要である。2000 年以降各地の PPI は全面改訂されており、ラ・アークの再処理施設に関するラ・マンシュ県の PPI も改訂版のドラフトが作成され、2008 年 1 月末現在、承認のための手続きが行われている段階で、まだ公開されていない²⁰⁾。

サンローラン・デゾー原子力発電所の PPI には、避難の実施時期は、下記の要件に応じて決定しなければならないとしている¹⁰⁾。

- ・家族と一緒に避難しやすくする（朝または夕方）。
- ・夜間より日中を優先する。
- ・悪天候を考慮に入れる。

避難はコミューン (commune) を単位として行われる。コミューンは日本の市町村に相当し*、実際そのように和訳されるのが普通であるが、日本の市町村に比べればはるかに小さな単位である(本報告では、以下、「コミューン」という。)。実際、自治体国際化協会の「フランスの地方自治」(2002年)²¹⁾によれば、10,000人以上のコミューンも全体の2%程度存在するものの、約9割が人口2,000人未満であり、50人に満たないものが約1,000も存在している。したがって、人口規模からはおおよそ日本の大字、小字、丁目のレベルから、いわゆる集落の単位に相当するものと考えられる。

サンローラン・デゾー原子力発電所¹⁰⁾やラ・アーク再処理施設¹³⁾のPPIを見ると、各コミューンごとの避難先の施設に2種類あることが分かる。つまり、「再集結場所」(Salle de regroupement)あるいは「集合センター」、及び「収容コミューン」(la commune d'hébergement)あるいは「宿泊センター」、である。各々の名称は各県のPPIによって多少の相違がある。この再集結場所あるいは集合センターを日本の地域防災計画にある「一時集合場所」と同じと考えてはならない。

フランスにおける避難は、米国よりもむしろ日本の方法に近く、県設備局が交通企業の車両と運転手の動員要請措置によって、企業から提供されるバスを避難のための国益保有車両数(PIN; Parc d'interet national)の一部として用意し、各コミューンに派遣する**。また、各コミューンにつき、それぞれ1台を後述する「ピックアップ・ポイント」に赴けない遠隔地住民の搬送にあてるとしている。ラ・アーク再処理施設のPPIには、85台または必要に応じてそれ以上の車が避難のために用意されると記載されている。また、バスを提供する企業及び台数、乗車人数、配備に要する時間(1時間～3時間)がPPIにはまとめて記載されている¹³⁾。

この避難車両のルート上の「ピックアップ・ポイント」(Points deramassage、またはRegroupement départと表記するPPIもある。)はあらかじめ決められ、PPIの表にルートとともにまとめられている。これが日本の「一時集合場所」に相当している。また、避難する住民が避難に際して持参できるものは、スーツケースまたはバッグを1個と制限されている。さらに、安定ヨウ素剤を入手していない住民を考慮して、避難の可能性があると判断された時点で、その実施前にあらかじめ避難ルート上の「ピックアップ・ポイン

* 日本のように人口規模等による市、町、村という区別はなく、また、行政単位として正式なものではないが、別に都市あるいは町(ville)、村(village)という語がフランスにはある²¹⁾。

** ただし、マルクール(Marcoule)原子力センターのPPIブックレット²²⁾には、自家用車を持っている人と自家用車がない、あるいは使えないために市の用意するバスを使う人と明確に分けて避難時の注意を記載している。サンローラン・デゾー原子力発電所¹⁰⁾やラ・アーク再処理施設のPPI¹³⁾では、住民が自発的に避難する公算も大きいこと、及び自力で脱出する者に対して道路封鎖を行っている憲兵隊が個人調査と予防的検査を受けるコミューンの公民館を記載した通知書を渡すこと、自家用車については必要に応じて各再集結場所に配置された放射線検出チームが検査と汚染除去を行うことが記載されており、自家用車利用の可能性は考慮しているものの、マルクール原子力センターのように積極的に認めるような記載ではない。そのため、マルクール原子力センターのPPIの広域区(10km圏)に含まれるガル(Gard)県とヴォクリューズ(Vaucluse)県では自家用車による避難を認めている可能性がある。

ト」に安定ヨウ素剤のストックを準備しておく。

避難車両は、ルート上のすべての避難住民を乗車させると、再集結場所に向かう。PPIによれば、この再集結場所では、避難してきた住民の調査と医療チェック、また必要に応じて汚染検査等を行うと記載されていることから、日本の「救護所」に相当するものである。汚染検査については、放射線検出チームが管理し、必要な場合には衣服も含めて予防的な汚染検査を行う。また、状況に応じて、必要な汚染除去あるいは専門施設への搬送を行うとしている。さらに、自力で避難してきた住民で、安定ヨウ素剤を入手していない者のために、希望に応じて安定ヨウ素剤を渡す。

なお、再集結場所の施設については、当該施設がまったく利用できない場合を想定し、代替施設もあらかじめ決められている。

再集結場所までの避難車両のルートも避難対象コミュニティごとにあらかじめ決められている。これは道路封鎖等の交通規制場所と連携して設定され、学校の生徒を搬送するバスや自家用車を利用して自力で脱出する場合のルートにもなっている。この避難ルートは、通常の風向きを考慮して設定され、通常と異なる気象条件の場合はルートを変更することとしている。また、例えばロアール川河畔にあるサンローラン・デゾー原子力発電所の場合、ロアール川を渡ることがないようにルートが設定されている¹⁰⁾。

住民の避難に用いるバス等には、1台に2人ずつの職員（救助要員とその他要員）が乗り込み、これらの職員はルートマップと乗客名簿用紙及び無線通信機を携行している。バスの車内で乗車した住民の情報を収集する。バスの先導は憲兵隊が行う。ラ・アーグ再処理施設のあるラ・マンシュ県では、バスにコミュニティのボランティアも付き添うと記されている¹³⁾。

学校に関しては、授業時間内に避難が行われる場合、バスを用いて、それぞれの学校から直接再集結場所へ搬送する。生徒の管理責任は引き続き教職員が負うとされている。詳しい記載がないが、学校から直接搬送することに対し、「その前に保護者が迎えに来た場合を除く」という記載もあるため、警戒フェーズあるいは即時対応フェーズにおいて、事前に生徒を帰宅させる、あるいは保護者に迎えに来させる措置を取る可能性がある。

米国では、事前に生徒を帰宅させた場合を除き、両親は避難後でなければ子供と会う、あるいは連絡することができない³⁾。パンフレット等によって、親に対して「学校に問合せをしないこと」、さらに「学校に子供を迎えに行ってはならないこと」を周知している。米国では、緊急時に学校周辺で迎えに来た保護者の車両等で混乱することを警戒しての措置であり、フランスはそれに比べると緩めた対応となっている。

再集結場所搬送後、保護者は生徒のいる再集結場所へ迎えに行く。保護者が迎えに来なかった生徒は、学校ごとにあらかじめ決められている宿泊センターである学校等に搬送される。

病人と高齢者については、他の住民とは別に、再集結場所を経由することなく、あらかじめ決められた病院および老人ホーム等に搬送する。

汚染除去の必要がない避難住民は、再集結場所あるいは集合センターから、県設備局が用意したバスを使って収容コミューンあるいは宿泊センターに搬送する。これが日本の「避難所」に相当する施設である。ラ・アグ再処理施設のあるラ・マンシュ県では、宿泊センターとして、再集結場所になるべく近い家族休暇村、学校等の寄宿舍、休暇センター、キャンプ場が選定されている¹³⁾。一方、サンローラン・デゾー原子力発電所があるロア・エ・シェール県では、収容“コミューン”と称されているように、再集結場所とそれほど離れていないコミューンが指定されているだけで、PPI に具体的な説明は記載されていない¹⁰⁾。ロア・エ・シェール県の PPI には収容コミューン内に設置される宿泊センターは別の「収容計画」を参照と記載してあるが、「収容計画」はインターネット上に公開されておらず、今回の調査では入手できていないため、詳細は不明である。しかし、上述したラ・マンシュ県の宿泊センターと考え方に大きな違いはないものと考えられる。

避難完了後、避難区域の最終的封鎖に先立ち、消防、憲兵隊等のパトロール隊がバスとともに区域内を巡回して徹底的な避難確認を実施する。このパトロールで避難区域内に残っている住民が発見された場合は、バスに収容し、再集結場所あるいは集合センターに搬送する。

上述のように、フランスでは PPI あるいはその付属関連文書に、コミューンごとに再集結場所及び宿泊センターの施設が割当てられ、コミューンから避難先までのおおよそのルートとともに記載されている。したがって、住民はバスで集結場所あるいは宿泊センターに搬送されるのであるが、PPI を見れば、避難指示等が出た場合、自分がどこに搬送され、どこに落ち着くことになるのか、おおよそ知ることができる。また、(決して推奨されてはいない様ではあるが、)自家用車によって自力で脱出する場合でも、どこを通過してどこに行かなければならないか、知ることができるし、移動途中で行き先の通知書が渡される仕組みになっている。

ただし、PPI は一般に公開された文書とはいいながら、基本的に各自が地方公共団体の役所に行かなければ閲覧できない。各家庭に配布されたり、ホームページで閲覧できる PPI のパンフレットに記載されているのは、前出のルブレイエ原子力発電所に係わる PPI 概要¹¹⁾ やマルクール (Marcoule) 原子力センターの PPI ブックレット²²⁾ のように避難時の一般的な注意事項と避難方法の概要のみであって、各コミューンに割当てられている避難先やルートまでは記載されていない。この住民への事前の周知徹底や情報の公開という点については、米国の積極的な住民向け広報の取り組み方と大きな違いがある³⁾。

原子力緊急時の防護対策という観点から、住民の避難計画において最も重要なのは、避難先施設、すなわち住民が危険区域を脱出して再集合する移動先施設、である。フランスの場合、ここで言う避難先施設は「再集結場所」である。「宿泊センター」は、既に危険区域を脱出した後の搬送先施設であり、上述したように「再集結場所」からあまり遠くないところに設定されるため、防護対策としてのクリティカルポイントにはならない。

米国の場合、避難先施設の選定は、半径 10 マイル (約 16km) の放射性プルームによ

る被ばくに関する緊急時計画区域（EPZ；Emergency Planning Zone。以下、「10 マイル EPZ」という。）の外側の施設でなければならないという規定がある*。すなわち、NUREG-0654⁶⁾の第Ⅱ章のJ節「Protective Response」の項目h.に、最低5マイル（約8km）以上離れていなければならないと規定されている⁶⁾。また、米国において、原子力災害にオフサイトの対応に当たる連邦緊急事態管理庁（FEMA；Federal Emergency Management Agency、以下、「FEMA」という。）が作成した州や地方公共団体向けの地域防災計画の作成規準書（SLG 101）²³⁾の付属書F「放射線ハザード」のタブ1「原子力発電所事故」に記載された「避難」の項に、“施設は10マイルEPZの境界の外側に位置すること”と規定されている。これによって、事故発生後、どのような事故進展の変化あるいは気象条件の変化が生じて、あらかじめ計画していた避難先の割当てを変更する必要がないように担保している。

フランスのPPIでは、屋内退避に係る広域区が原子力発電所では10km、再処理施設では5kmであるのに対して、住民の避難計画の策定において、原子力発電所では50km、再処理施設では15kmの範囲について地域の全般の特徴を考慮する必要があるとし、避難の際の集合場所はこの範囲内に設けなければならないとしている。

実際、再集結場所の施設は、広域区（原子力発電所；10km、再処理施設；5km）を大きく越えて、かなり離れた地点の多目的ホール等が選定されている。表-1、表-2に、サンローラン・デゾー原子力発電所及びラ・アーク再処理施設のPPIにある「再集結場所リスト」から、再集結場所のコミュン名、集合センター(再集結場所の施設)、当該原子力施設からの距離、収容人数をそれぞれ示す。ただし、表中の「当該原子力施設からの距離」は、本調査において筆者が地図から計測して得た値である。これらの表から、再集結場所として、原子力発電所であれば16km～35km、再処理施設では13km～19kmの施設が選定されていることが分かる。

フランスにおいて、米国のような、再集結場所について屋内退避に係る広域区の外側の施設でなければならないというような選定基準が設けられているかどうかは今回の調査の範囲では確認できなかったが、事実上、再集結場所は広域区の外側の施設が選定されている。

2.4 フランスの緊急時計画から見た日本の原子力防災計画

我が国では原子力安全委員会が、“原子力施設等の防災対策について”¹⁹⁾（以下、防災指針という。）において、コンクリート屋内退避は防護対策として重要視すべきとし、避

*なお、前回調査の報告書³⁾における誤りをここで訂正しておく。前回報告書の第6章(2)に「第3.2.3項で述べたように、」として同様な記述があるが、「第3.2.3項」の引用は誤りであり、正しくは、この段落に記載した、「すなわち、…」から「…に担保している。」までの文章及び引用文献が当該引用に相当する。

難と同等の記載がなされている。しかし、この記載はその遮蔽効果のみに着目したもので、実際に住民が自宅からコンクリート屋内退避施設に移動するために要する時間について言及していない点に注意が必要である。この住民の移動措置は、地域差が大きいものの、場所によっては避難と同様に何らかの交通手段を要する可能性がある。コンクリート屋内退避といえども、特別に居住性等を考慮した施設でない限り、第 2.1 節(3)で述べた通常の屋内退避と同様に 48 時間程度の許容時間の制限が適用されるべきものである。したがって、住民が徒歩ですぐに移動できる適切な施設がない地区においては、コンクリート屋内退避よりも避難を優先的に実施するべきと思われる。もし、避難ができる時間的な余裕があるのであれば、よほど復旧作業の見通しがあり、放射性物質の放出継続時間が短いという確証がない限り、コンクリート屋内退避よりも避難を優先的に考えるべきである。

また、前回調査の報告書³⁾で述べたように、我が国では、防災指針¹⁹⁾において、「防護対策を重点的に充実すべき地域の範囲 (EPZ)」(以下、「防災指針 EPZ」という。)を設定しているが、防災訓練等の記録を見る限り、救護所や避難所は事故の状況評価に基づいて設定する防護対策区域の外側に設定しているものの、防災指針 EPZ の範囲内にある施設を選定しているケースがほとんどである。

実際に施設外部に影響が及ぶような重大な原子力発電所の事故において、事故の応急対策が短期間に成功し、放射性物質の放出が数時間以内に停止できるという保証は常にあるわけではない。防護対策は、短期間の事態収拾についてよほど確かな見通しがない限り、風向など気象条件の変化や事故の進展(悪化)といった万一の状況変化を見越して行う必要がある。避難住民の再避難、あるいは避難所における屋内退避措置を取らなければならないような事態は避けなければならない。

防災指針 EPZ は「防護対策」を重点的に充実すべき地域であって、防災計画の適用範囲ではない。防災指針 EPZ は「技術的に起こり得ないような事態までを仮定し、十分な余裕を持って原子力施設からの距離を定めたものである」から¹⁹⁾、地域防災計画では、防災指針 EPZ の範囲内全域に対して少なくとも屋内退避を、そしてその範囲内の当該原子力施設に近い一部区域について避難ができるように準備しておくことが重要である。また、防災指針の第 3-3 節に、地域防災計画の策定等に当たっての留意点として、「事故の形態によっては、EPZ の外側であってもなんらかの対応が求められる場合も全くないとはいえないものの、その場合にも EPZ 内における防災対策を充実しておくことによって、十分に対応できるものと考えられる。」(原文抜粋)という記述があることについて、もっと注目されるべきと思われる。防災計画において、防災指針 EPZ の範囲内全域に及ぶ防護対策(屋内退避)が実施できるように準備を考えて、はじめて、防災指針 EPZ の外側での対応が求められるような万一の事態でも対応できるというのが、防災指針の示しているところである。

したがって、救護所あるいは避難所を防護対策が実施される可能性のある防災指針 EPZ の範囲内に設置することは望ましくない。我が国の防災指針 EPZ に相当する米国の

10 マイル EPZ や前述したフランスの広域区でも同様な考え方をしており、米国では NRC の規準の中で避難先施設は 10 マイル EPZ の外側に設定することが望ましいと規定し、また、フランスでは避難計画において広域区の外側にある施設を選定していることは前述したとおりである。

10 マイルあるいは 10km を越える範囲への避難は、多くの場合、市町村の境界を越えた搬送を必要とする。実際、米仏両国の避難計画は、前述や前回調査の報告で述べたようにほとんどが市町村やコミューンの枠を越えた避難であり、州（米国）あるいは県（仏国）の強力な主導によりこのような広域避難が実現している。我が国においても防災指針 EPZ の外側に救護所あるいは避難所を設置することは、市町村の境界を越えた広域避難となることは避けられず、地域防災の中心となっている道や県の主導的な役割が求められる。

表-1 サンローラン・デゾー原子力発電所の再集結場所

再集結場所の コミュニティ名	集合センター (場所)	原子力施設 からの距離	収容人数	
ロ ア ・ エ ・ シ エ ール 県	ブラシユ	体育館 (キャンディー通り)	19km	約 700 人
	デュイゾン	祝典会場 (市街)	16km	約 600 人
	ラ・シャペル・ バンドモアーズ	公民館 (学校通り 6 番)	26km	約 760 人
	マルシュノアール	憩いの広場 (サンローラン・デ・ボア街道)	18km	約 200 人
	ウック	公民館 (クレマンティーンヌ・ マルタン通り)	24km	250～300 人
ロ ア レ 県	フルリー・ レゾーブレ	ギー・モケ室内競技場	35km	約 500 人
	ラ・シャペル・サン メマン	祝典会場 (学校前袋小路 国道 152 号線沿い)	27km	約 220 人 (大ホール)
	オルレアン・ ラ・スルス	屋内競技場 (バンドーム通り)	30km	約 300 人
	サラン	祝典会場	34km	約 400 人
	サンジャン・ ドゥラ・リュエル	体育館「レ・トロア・フォン テーヌ」	30km	約 500 人

表-2 ラ・アーク再処理施設の再集結場所

避難対象の コミューン名	集合センター	原子力施設 からの距離	避難対象人数
エルクヴィル	ケルクヴィル 海軍訓練センター*	約 13km	160 人
ジョブール	ケルクヴィル 海軍訓練センター	約 13km	460 人
ポーモン・ラ・アーク 及び ヴォヴィルの 一部	レ・ピウ多目的ホール	約 19km	1,720 人
ディギュルヴィル	ケルクヴィル 海軍訓練センター	約 13km	250 人
オモンヴィル・ ラ・プティット	ケルクヴィル 海軍訓練センター	約 13km	150 人

* Centre d'instruction naval (C.I.N.) de Querqueville

3. 原子力緊急時の住民避難における米国の避難時間評価

米国では商業用原子力施設の運転許可要件としてオフサイトを含む緊急時対応計画の作成が義務付けられている。これは、既に運転許可を得た施設の運転継続に係る許可要件についても同じである。原子力施設の緊急時対応計画の作成規準は NRC の NUREG-0654⁶⁾ である。前回調査の報告書で記したように³⁾、NUREG-0654 の規定によって、米国の原子力施設の緊急時対応計画には、10 マイル EPZ (半径約 16km) あるいは 50 マイル EPZ (半径約 80km) の範囲に含まれる州及び郡の緊急時対応計画とともに、10 マイル EPZ の範囲内に居住する住民及び一時滞在者を EPZ の外に避難させるのに要する時間を評価した結果、すなわち ETE レポートを添付しなければならない。

原子力施設の 10 マイル EPZ の範囲内に居住する住民等の人口分布や周辺道路状況は時とともに変化するため、ETE は 10 年以内を目処に、施設の運転継続申請時に再評価することになっている。

第 2 章でも述べたように、“即時対応”においては、EPZ 内のどこまでが事故の影響範囲となるのかという判断、そして放射性物質の放出前にこの範囲内の住民の避難が完了できるのか否かの判断において、当該地区の“避難に要する時間”は非常に重要なキープクターである。あらかじめ当該地区の“避難に要する時間”を ETE によって把握しておかなければ、実際に原子力災害が発生した際に防護対策の失敗、あるいは判断の誤りを招き、時には住民を危険にさらしてしまう可能性すらあるであろう。

しかし、ETE の実施ということでは、上述したような基準を設けている国は米国以外には確認できなかった。また、公開文献の範囲では、米国以外で原子力施設における ETE 実施例を確認することもできなかった。我が国やフランスと異なり、米国における原子力災害時の避難では、住民は自分の自家用車で避難するのが基本であり、地方公共団体が用意するバスを使用して避難するのは、学校の生徒、自家用車の無い、あるいは運転のできない世帯、入院等で病院や老人ホームにいる住民に限られている。そのため、避難時には多数の避難車両が短時間に発生することになり、ETE に基づく事前の緻密な避難実施計画は、避難をより円滑に実施する上で他国以上に重要であるという米国の事情が、米国における ETE 研究や実績の背景にある。米国以外の国ではこのような状況にないが、それでも、前回調査の報告書で紹介した新潟県柏崎市の原子力災害時避難誘導マニュアルの例もある^{1,3)}。したがって、米国のような高度な評価手法を確立しているかどうかは不明であるが、フランスをはじめ各国においても、地方公共団体のレベルで“避難時間の予測”を行っており、結果が公開されていないだけと考えるほうが妥当であろうと思われる。

前回調査の報告では、NRC の NUREG-0654 を中心に米国の ETE の全体概要を紹介した³⁾。本章では、米国の原子力発電所の避難時間評価レポートの実例を基に、ETE の実態と、その核となっている交通シミュレーションに関して、各種モデルの開発（作成）と適用についてまとめた。

3.1 原子力発電所の避難時間評価レポート

上述したように、米国で実施されている原子力施設のオフサイト緊急時対応計画に係る ETE は、ETE レポートとしてまとめられ、商業用原子力施設の設置許可申請あるいは運転継続の許可申請の中の緊急時対応計画の付属文書として NRC に提出される。これらの提出文書がすべての原子力発電所について公開されているのかどうかは確認していないが、最近提出された一部の原子力発電所については公開文書として NRC がインターネット上に公開している。今回調査で入手した米国の商業用原子力発電所の ETE レポートを表-3 に示す。入手した ETE レポートの多くは新規原子力発電所サイトあるいは新規プラントの設置許可申請に係る ETE の結果を記載したものである。

今回調査で入手した ETE レポートは、KLD 社と IEM 社の 2 社が占めている。特に 2006 年以降の新しい ETE レポートはほとんど KLD 社が独占状態である点が注目される。今回調査の手段は限られており、本当に KLD 社が独占状態であるのか、上記 2 社以外に実施した実績がないのかを確認することはできないが、最近公開された ETE レポートとしてインターネット上の検索にかかるものは KLD 社のレポートが圧倒的に多いことは事実である。

ミルストーン原子力発電所 (Millstone Power Station) の ETE レポートについては、Dominion Nuclear が提出した緊急時対応計画は入手できなかったが、2003 年にニューヨーク州の委託を受けてジェームス・リー・ウィット・アソシエーツ社 (James Lee Witt Associates) が実施した“インディアンポイント原子力発電所及びミルストーン原子力発電所に関する防災対策評価報告”(Review of Emergency Preparedness of Areas Adjacent to Indian Point and Millstone,) で、そのほぼ全容が確認できる²⁴⁾。ただし、ETE を実施したアース・テック (Earth Tech) 社は、現在交通シミュレーションに係る事業は一切行っていない。アース・テック社は、HMM Associates 社の時代に Sheffi らがマクロ交通シミュレータ NETVAC コードを開発し²⁵⁾、その後アース・テック社に社名を変更後も NETVAC コードによる交通シミュレーションを利用したコンサルティング業務を行っていた。本解析はその当時実施されたものである。また、同社は 1994 年にインディアンポイント原子力発電所及びサウステキサス・プロジェクト原子力発電所の ETE を実施している。しかし、その後、交通シミュレーション部門は解散し、現在に至っている。

IEM 社は、2001 年の時点では正式社名を Innovative Emergency Management, Inc. と称していたが、最近では IEM, Inc. を正式名としている。IEM 社は、上述の 2003 年のジェームス・リー・ウィット・アソシエーツ社の“インディアンポイント原子力発電所及びミルストーン原子力発電所に関する防災対策評価報告”において、KLD 社及びアース・テック社がエンタジー社から受託して行った ETE について、クロスチェックを請け負った会社である²⁴⁾。また、IEM 社は、2001 年当時ドミニオン(Dominion Virginia Power)社の依頼を受けてノース・アンナ原子力発電所(North Anna Power Station)の ETE を実施した²⁶⁾。このときは、オークリッジ国立研究所 (ORNL) が化学物質貯蔵庫事故の避難

計画検討用に開発した OREMS (Oak Ridge Evacuation Modeling System) コード²⁷⁾を使用している。2006 年にドミニオン社がノース・アンナ原子力発電所の事前審査申請 (Early Site Permit Application) の際、NRC が ETE レポートの提出を要求した際、この 2001 年の ETE レポートを再提出している。しかし、同社は翌 2007 年 5 月に KLD 社を使って ETE の再評価を実施し、同年、ノース・アンナ原子力発電所 3 号機の一括申請 (Combined License Application) においてこれを NRC に提出している²⁸⁾。ドミニオン社が ETE を再評価するに至った経緯は不明であるが、後述するように KLD 社の ETE は、IEM 社や前述のアース・テック社と比較すると、住民調査に基づく非常に系統的、実証的な手法を用いている点がユニークであり、2005 年の NRC の ETE に関する最新の解析方法に関する解説書 (NUREG/CR-6863)²⁹⁾で推奨されている評価手法に準拠している。NRC の審査において、ETE ではこのような手法を用いることが推奨されている可能性は十分ある。そのような NRC の指導があるとなれば、2006 年以降に KLD 社の ETE 実績が非常に多いことと一致する。

なお、IEM 社は、2006 年のボグレル原子力発電所 (Vogtle Electric Generating Plant) の新規プラント設置に関する ETE を実施した際には³⁰⁾、ドイツのカールスルーエにある PTV AV 社が開発した VISUM コード³¹⁾を使用している。

表-3 に示したように、今回調査で入手した ETE レポートは KLD 社のものがほとんどであり、実際 2006 年以降の新しい ETE レポートは KLD 社がかなりのシェアを持っているものと考えられる。KLD 社は、FEMA が NUREG-0654 付属書⁴⁾を受けて、原子力発電所事故時の避難計画検討を目的とした広域交通流シミュレータの開発を始めた際に、同社の Goldblatt らがその開発を受注し、1984 年に I-DYNEV (Interactive DYNAMIC EVacuation) コードを構築、その後 25 年以上に渡り米国内の原子力発電所の ETE を実施してきた実績を持ち³⁶⁾、1988 年には NRC の「原子力安全及び認可委員会 (ASLB)」のベンチマーク試験も行われている³⁷⁾。

KLD 社の ETE レポートは、使っているモデルや評価プロセス、住民調査の方法、さらに報告書の構成等すべて様式が統一されている。次節では、KLD 社の ETE レポートを基にして、ETE の方法及び使用する各種モデルについて実例をまとめる。

3.2 KLD 社の避難時間評価

KLD 社の ETE レポートは、おおむね同社の ETE 手順に沿ってまとめられている。図-1 に同社の ETE 作業フローを示す。同社が ETE のサーベイや評価に要している期間は、原子力発電所 1 ヶ所当たり 7~12 ヶ月である。ETE を実施するに当たり、KLD 社は受託事業の契約者である事業者、及び州や群の地方公共団体の緊急時対応担当者とは打合せを行っている。

サウステキサス・プロジェクト原子力発電所及びインディアンポイント原子力発電所の例について、KLD 社の ETE レポートをもとに^{33,34)}、アース・テック社の 1994 年に実施

された ETE と KLD 社の 2007 年の ETE について、ETE における各種モデルと使用データベースに関する比較を表-4 に示す。これらを例として比較したのは次の理由による。

- ① サウステキサス・プロジェクト原子力発電所及びインディアンポイント原子力発電所は遠隔地と市街地の原子力発電所の例として人口分布に大きな差がある。
- ② サウステキサス・プロジェクト原子力発電所及びインディアンポイント原子力発電所は北米大陸の南部と北部の代表として選定できる。特に後者は降雪の影響が考慮されている。
- ③ いずれも前回評価はアース・テック社、新評価は KLD 社が実施しており、新旧のベースが同じで、比較が容易である。さらに、アース・テック社の評価手法やデータベースの考え方は前出のボグル原子力発電所（2006 年）の IEM 社が行った ETE と非常に近い。

以下に KLD 社の ETE の手順の概要と、それに関連した ETE の各種モデルについて述べる。

(1) ETE データの情報収集

国勢調査データと発電所周辺の地図情報データを入手。地図情報データは道路ネットワークの現地調査計画の検討に資する。

国勢調査は毎年実施されるわけではないため、解析時の最新の人口データを入手できるとは限らない。KLD 社は表-4 に示したように、過去の国勢調査から当該年の人口を統計学的に外挿予測して用いている。しかし、サウステキサス・プロジェクト原子力発電所のケースでは 2000 年及び 2005 年の国勢調査がわずかに 0.3%ほど減少傾向を示していることから（1990 年の国勢調査と比較するとさらに減少は大きい）、2007 年の人口を 2000 年と変化なしと保守側に評価している。このことから、評価方法はケースに応じて変えているが、ETE に用いる人口データは、過去の国勢調査の数値をそのまま用いるのではなく、解析するべき当該年の予測評価値を用いている。

国勢調査データでは分からない住民に関する情報を電話調査によって取得する点が、KLD 社の ETE レポートの非常にユニークな点であり、注目される。電話調査の手順書と内容については事前に州や郡の担当者のレビューを受けておく。

電話調査によって取得するデータは以下である。

- ① 各世帯の人数、車両保有数及び避難車両あたりの乗車数
- ② 地区外への通勤者に係る情報
 - ・地区外通勤者の自家用車の相乗率；通勤の際、隣人や友人と相乗りで出かける割合
 - ・地区外通勤者の残留家族に関する情報；地区内に残留している家族が自家用車を使用し得る世帯数
 - ・移動準備時間(mobilization time)；避難勧告を発してから、住民が避難準備を整え、移動を開始するまでの時間であるが、地区外通勤者の動向によって以下の 3 つに分類し、評価する。

- a) 通勤者が帰宅してから避難する住民
- b) 帰宅する通勤者がいない住民
- c) 地区外からの通勤者等の一時滞在者

通勤者の行動を細分化し、夫々に要する時間を住民に回答してもらい、この種の住民意識調査の手法によって分析する。電話調査によるデータはサンプリングであり、また住民の回答に不確かさが避けられない。そのため、聞き取り調査の項目には不確かさを低減できるような工夫が必要であり、また移動準備時間は住民の回答結果を単純に積算すればよいものでもない。この移動準備時間評価をはじめ、電話調査によるデータ取得には統計学と世論調査技術が駆使されている。

各郡の就業者、一時滞在者及び特別な施設に関する調査データの収集は郡の担当者に実施してもらおう。地区外から入ってくるものも含め、地区内の就業者に係る車両数については、この郡の情報に、さらに航空写真や商業活動特性に関する KLD 社独自の分析結果を加えて評価している。航空写真は、企業や大規模小売店等における駐車場の利用状況を把握し、地区外からの一時滞在者の評価に資するものである(重複してカウントする可能性がある)ので注意を要するとのコメントがある。

道路ネットワーク構造と容量に関する情報は、基本的に地図情報と米国学術研究会議中の輸送研究委員会がまとめている道路交通容量マニュアル(HCM ; Highway Capacity Manual)を用いている。我が国でも最近道路交通容量のデータベースが整備されてきている³⁸⁾。しかし、道路容量や自由走行速度等はこの HCM マニュアルの情報だけでは ETE には不十分で、実際に走行し、道路状況を詳細に観察する必要があるため、現地調査が必要とされている。

後述するように、KLD 社の ETE では、10 マイル EPZ に対して、解析範囲を半径 15 マイルのエリアとし、その範囲内の道路ネットワーク構造と容量に関する情報を作成している。

(2)交通需要評価

収集した調査データから、避難車両を含む各地区の車両数発生数、すなわち交通需要、と交通流生成率を評価する。交通流生成率は、交通需要をもとに前出の移動準備時間を用いて時間の関数として決定する。

交通需要は ETE において最も重要なパラメータである。交通需要は、前項で述べた、国勢調査をベースに予測評価した定住者と別荘の居住者からなる人口データ、電話調査によって取得した自家用車保有数等住民に関するデータ、及び就業者、一時滞在者及び特別な施設に関する調査データから作成する。

自家用車が利用できない避難住民は、近隣の住民に相乗りさせてもらうか、地方公共団体が用意するバスを使用して避難する。前者は電話調査によって把握され、後者は本節第(5)項で後述するように、通常の住民避難の ETE とは別の解析で取扱われる。学校の生徒、

入院等で病院や老人ホームにいる住民も同様で、通常の住民避難の ETE からは除外されている。

ETE においては、避難車両以外で特に考慮しなければならない交通需要がある。これは特定の時期にだけ発生し、無視できない道路交通需要を発生させるもので、季節のイベントや大きな観光施設等が該当する。例を記すと、サウステキサス・プロジェクト原子力発電所の場合、マタゴダ (Matagorda) ビーチが近くに存在している。マタゴダビーチ自体は 10 マイル EPZ の外側であるが、そこに通じる幹線道路が 10 マイル EPZ を貫いているため、マタゴダビーチの住民と観光客は避難対象になることはほとんど考えられないが、彼らが移動するときは危険な範囲を通過することになる。さらに、休日には 6,000 人あまりの人口が集中しているため、緊急時計画にはこの地区の人々への対応を考慮しなければならない。また、ETE では、このような人々の移動を必ず避難経路の道路ネットワーク上に考慮しなければならない。また、サウステキサス・プロジェクト原子力発電所では新規プラントの建設工事が始まっているため、その作業や工事用車両の影響を評価している。一方、インディアンポイント原子力発電所の場合は、ウェストポイント地区にある USMA フットボールの開催や陸軍士官学校の卒業イベントの影響を評価に入れている。

小規模なイベント等であれば、交通規制等である程度影響を緩和できるので ETE で考慮する必要はないが、上記の例は、季節や天候等と同様に ETE の外的条件の一つとして、別な解析ケースとして実施する必要がある (本節第(4)項参照)。

交通需要と交通流生成率は、NUREG-0654 付属書 4 にしたがって、10 マイル EPZ を分割して設定した緊急時対応計画区域 (ERPA ; Emergency Response Planning Areas) ごとに整理する⁶⁾。緊急時対応計画区域は既に地方公共団体が設定し、住民に周知しているので、既存の区割りをを用いるのが基本である。

次に、この緊急時対応計画区域から、2 マイル、5 マイル、10 マイルの全方位あるいは風下方向を含む“キーホール”形状の避難区域のパターンを作成する。サウステキサス・プロジェクト原子力発電所の場合、11 の緊急時対応計画区域により避難区域は 22 パターン作られた。インディアンポイント原子力発電所の場合、(人口が多いことから)51 の緊急時対応計画区域があり、避難区域は 35 パターン作られた。表-5 にサウステキサス・プロジェクト原子力発電所の避難区域パターンを例として示す。避難区域の方位は KLD 社の ETE レポートでは角度範囲で表記されているが、おおむね 16 方位に分割されていると考えてよい。しかし、風下方向の避難区域の範囲(開き具合)は、3 方位に固定しているわけではなく、おおむね 3 方位~8 方位(180°)の範囲で狭いケースと広いケースの 2 通りを設定している。これは、緊急時対応計画区域の区割りの関係もあるが、明らかに放射性物質の拡散の狭いケースと広いケースを意識したものと考えられる。

10 マイル EPZ の全域避難というケースを除けば、実際に避難の移動をしなければならない住民は、EPZ 内の上記の避難区域パターンに該当する一部の緊急時対応計画区域だ

けである。事故の影響を受ける領域は放射性物質の拡散に応じた区域であるため、ある緊急時対応計画区域のほんの一部だけが、それに含まれる場合がある。その場合、当該緊急時対応計画区域全体について避難措置を取るかどうかは、被ばく線量だけで決められるものではないので、実際の緊急時対応では判断が難しい。KLD 社の ETE レポートにおいては、当該緊急時対応計画区域全体を避難として解析すると説明している。また、当該緊急時対応計画区域が EPZ の外側を含んでいるケースでは、当該区域は屋内退避措置となるであろうと、KLD 社はコメントしている。しかし、ETE レポートに掲載されている避難区域パターンの図では、緊急時対応計画区域全体を避難区域に含めているパターンとまったく省いてしまっているパターンが混在しており、風向と緊急時対応計画区域の大きさに応じてケース・バイ・ケースで決定している。

上述した避難区域パターンは避難勧告対象地区であって、当該地区内の住民は避難すべき対象である。しかし、前回調査の報告書でも述べたように、避難勧告対象地区の周囲において避難対象となっていない住民によって自発的に行われてしまう計画外の避難がある³⁾。このような計画外で発生する避難を考慮する必要性は前出の NUREG/CR-6863³⁰⁾で指摘されている。KLD 社の ETE の重要な特徴のふたつ目は、この計画外の避難の影響を解析に考慮していることである。KLD 社の ETE では、この計画外の避難を、“自発的避難”*と“影の避難”の2種に区別して評価している。

“自発的避難”は、10 マイル EPZ 内において、避難勧告がないにも拘らず住民の自主的判断から引き起こされる避難であり、2003 年の ETE レポートにおいて KLD 社の採用したモデルでは、半径 5 マイル以内の風下方向ではない地域で 50%、5～10 マイルの（屋内退避に相当する）地域で 35%の住民が避難行動を取るとしている(図-2 参照)。また、“影の避難”は、10 マイル EPZ より外側の、事故の短期的な影響はほとんどなく、緊急時の応急対策として行われる防護対策もまったく実施されない区域において、当該区域の住民が原子力発電所から離れようとして避難行動を取るもので、緊急時計画の想定範囲外で発生するためこのように称される。KLD 社の採用したモデルは、10 マイル EPZ の周囲に 5 マイルの幅で“影の領域”を想定し、この領域内で 30%の住民が避難行動を取るとしている(図-2 参照)。

KLD 社は、この“自発的避難”及び“影の避難”のモデルを、2002 年から 2003 年にかけて見直したもようである。それは、第 3.1 節で述べたジェームス・リー・ウィット・アソシエーツ社の“インディアンポイント原子力発電所及びミルストーン原子力発電所に関する防災対策評価報告”において²⁴⁾、KLD 社が 2002 年にエンタジー社に提出したインディアンポイント原子力発電所の ETE レポートでは、上述した“自発的避難”及び“影の避難”のモデルの数値と異なっていることによる。両者のモデルの相違を図-2 中に記

* “自発的避難”は voluntarily evacuation の訳語であるが、前回調査の報告書では、これを“自主的避難”という訳語を用いている³⁾。今回の調査において、訳語を“自発的”に改めた。

した。なお、この KLD 社の“自発的避難”及び“影の避難”のモデルは、ETE レポートによると、米国学術研究会議輸送研究委員会に所属するコロラド州立大学の Dennis S. Mileti 教授ら数人のエキスパートの知見によるものだと記載しているが、その根拠となる文献等は今回調査の範囲では不明である。

“影の避難”について、2005 年に一般災害における避難の調査分析を行った NUREG/CR-6864 において³⁹⁾、一般的には発生しても大きな渋滞の発生や避難の著しい障害の原因とはなっていないと報告しているが、同じ著者による、前出の NUREG/CR-6863²⁹⁾では、一般災害におけるこのような傾向は、比較的小規模の避難において観察されるものであり、(これまでに実経験はないが、原子力災害のような)規模の大きな避難においては、それが大きくなるにつれて“影の避難”の影響も大きくなるであろうと述べている。また、適切な交通規制を行えば“影の避難”の影響は緩和できるとの指摘を引用している。

前出のジェームス・リー・ウィット・アソシエーツ社の“防災対策評価報告”では²⁴⁾、やはり Dennis S. Mileti 教授の言として、“影の避難”の発生は「平常時における原子力発電所の事故に関する住民や公衆の教育によって大きく緩和でき得ること」、また、「事故や対応行動に関する説明を行う機関の信頼性に大きく影響を受けること」の指摘があったことを述べている。

(3)交通シミュレーション

ETE の評価範囲は、避難勧告の発出と同時にサイレンによる避難警報が吹鳴し、住民の行動が開始されることから、最後の避難車両が影響範囲(10 マイル EPZ)を出るところまで計算する。KLD 社の解析上の仮定として、避難勧告の発出、避難警報の吹鳴、住民の行動開始の3つのシーケンスは同時とされている。

ETE の外的条件の内、季節、平日/週末、昼/夜及び行事のパラメータは前の本節第(2)項の交通需要評価で作成した入力データによって設定する。しかしながら、もうひとつの ETE の外的条件である天候については、道路交通容量、自由走行速度及び移動準備時間に影響するモデルとして評価に取り入れられる。一般に雨天あるいは降雪時には、車間距離が大きくなり、速度も低下するため、道路交通容量及び自由走行速度は低下する。

KLD 社の ETE では表-6 に示すモデルを用いている。雨天においては、道路交通容量、自由走行速度はいずれも好天時に比べて 90%に低下するとしている。しかし、移動準備時間については、雨天でも影響はないとしている。降雪の影響は、インディアンポイント原子力発電所のケースのみ³³⁾、道路交通容量、自由走行速度はいずれも好天時に比べて 80%に低下するとし、移動準備時間について移動前に除雪作業が入ることを考慮しているが、新規の原子力発電所サイトとして設置許可申請が行われているベレフォンテ(Bellefonte)原子力発電所³²⁾及びウィリアム・リー(William S. Lee)原子力発電所³⁵⁾の ETE レポートでは、いずれも 85%としており、移動準備時間については変化がないとし

ている。

なお、サウステキサス・プロジェクト原子力発電所³⁴⁾及びノース・アンナ原子力発電所²⁸⁾では、雨天のみが考慮されている。サウステキサス・プロジェクト原子力発電所は南部であるため理解できるが、ノース・アンナ原子力発電所で降雪を考慮しなくてよい理由は不明である。

避難経路は、KLD 社が選定し、原子力発電所の事業者及び地方公共団体の緊急時対応担当者に提示している*。KLD 社は PC-DYNEV を使用した ETE の主解析を実施する前に、より簡易な交通シミュレータ TRAD (Traffic Routing And Distribution) を用いて粗い避難経路の試計算を行う。TRAD は各避難経路の走行に要する大まかな時間を解析することができるが、より重要な機能として NUREG-0654 付属書 4 に規定された避難経路の選定基準に合致した経路の候補を自動選択し、表示することができる。これによって、各地区ごとに最適な避難経路を選定し、ETE の主解析に必要な PC-DYNEV の入力データを作成する。

原子力災害時の避難における ETE において使用する交通シミュレータの選定については多くの議論がなされている。交通シミュレータは、解析対象とする地域の道路ネットワークを“リンク”と称されるセグメントとそれを結合する“ノード”で表現する点は、すべてのシミュレータに共通している。KLD 社の ETE では、サウステキサス・プロジェクト原子力発電所の例ではリンク数 574 個、ノード数 389 箇所であるが、人口密度が高く、道路網の発達したインディアンポイント原子力発電所の例ではリンク数 2132 個、ノード数 1031 箇所に及ぶ。

交通シミュレータは、個々の車両を離散的に取扱うマイクロシミュレータと交通流を流体として近似的に取扱うマクロシミュレータに大別されることはよく知られている。マクロシミュレータには、交通流を流体として取扱うのではなく、車列をブロックあるいは小隊 (platoon) として取扱い、マイクロとマクロの中間的なシミュレータ**も含まれている。

しかし、現在では交通シミュレータの選定は、マイクロとマクロのモデルの違いよりも、むしろ各交通シミュレータがそれぞれどのような適用対象に適しているか、どのような入力情報が必要か、どのような出力情報が提供されるかが重要であるとされている⁴⁰⁾。

それでも、ウィスコンシン大学の Sattayhatewa らは⁴¹⁾、いくつかの交通シミュレータを比較して、連邦道路庁 (FHWA) が開発した最も歴史のある、一般によく知られたマイクロシミュレータのひとつである NETSIM について、堅固で矛盾がなく、信頼性が高いと評価しながらも、原子力発電所の事故時の避難への適用については入力データの取得、作成が大変なこと、比較的広範囲に及ぶ避難の解析に適さないことを指摘し、前出のマクロシミュレータ、正確にはメソ・シミュレータ(本頁脚注参照)に分類される DYNEV

* KLD 社の原子力発電所の地域防災計画コンサルティング業務を行っており、単に ETE のみを受注するだけではなく、各地の緊急時計画全体についてコンサルティングしている。

** このような交通シミュレータモデルを、米国では特に「meso-scopic モデル」と呼んでいる⁴⁰⁾。

(I-DYNEV の旧バージョン)や NETVAC が優位であると述べている。また、KLD 社の Goldblatt は、NETSIM をベースにしたマイクロシミュレータ WATSim と PC-DYNEV (I-DYNEV のパーソナルコンピュータ (PC) バージョンで性能的には I-DYNEV と同等) の比較をインディアンポイント原子力発電所の ETE を実施する際に行っている⁷⁾。その結果、ETE 解析値においては 5%以下の違いしかなかったのに対して、解析に要した時間では WATSim では PC-DYNEV の 300 倍という差があったと報告し、ETE においてマイクロシミュレータを用いる合理的な理由はないと指摘している。

オークリッジ国立研究所の Chang は、米国で一般災害を含む避難計画の検討に使われている 3 種類のシミュレータ、PBS&J、OREMS 及び DYNEV について、緊急時の避難という観点から比較評価を行っている⁴²⁾。これらはいずれもマクロシミュレータであり、前述のメソ・シミュレータに分類される。PBS&J モデルは、1999 年に米国で発生した非常に大きなハリケーン「フロイド」の際、フロリダ半島でこれまで出最大の住民避難が行われ、そのときの教訓をもとにモービル (Mobile) 地方合衆国陸軍技術軍団 (US Army Corps of Engineers) と運輸省が共同で PBS&J 社に実施させた「南東合衆国地区ハリケーン時避難の交通研究」(Southeast United States Hurricane Evacuation Traffic Study) の中で開発、整備された web 上で利用する避難検討用交通シミュレータである⁴³⁾。PBS&J は、4 人の創設者 (Post, Buckley, Schuh 及び Jernigan) の頭文字をとったもので、社名となっているが、彼らの開発した交通シミュレータに特別な名称が与えられていないため、Chang は論文の中で“PBS&J モデル”と呼んだものである*。

PBS&J モデルについては、使用している解析モデルやシステム構造に係る情報はユーザーのみに限られ、インターネット上で公開されていない。Chang の文献から、基本的なシミュレーションモデルはメソ・シミュレータで、OREMS 等と大きな違いはないことが示唆されているが、詳細は今回の調査の範囲では不明である。

Chang は、彼の行った比較評価の中で、各交通シミュレータの解析性能や信頼性については特に問題を指摘していないが、PBS&J 及び OREMS の入力データの作成や取扱いのしやすさ(利用者とのインターフェイス)について述べ、DYNEV より有利であるとしている**。また、特に PBS&J が地域の防災担当者が使う上で、広域の避難に関する入力データの作成等の扱いやすさの点で優れているとしている。

KLD 社が ETE で使用している I-DYNEV コードは、連邦道路庁 (FHWA) の道路施策検討のために開発された TRAFLO コードや CORFLO コードといった交通シミュレータをベースに開発されたメソ・シミュレータである⁴⁵⁾。PC の発達により、それまで大きなコンピュータやワークステーションでなければ実行できなかった I-DYNEV コードを

* Chang の論文発表と相前後して、PBS&J 社は当該交通シミュレータを ETIS (Evacuation Traffic Information System) と称している⁴⁴⁾。

** DYNEV もしくは I-DYNEV の入力や取扱いの問題を指摘する文献は他にもいくつか存在している²⁷⁾。しかし、PC-DYNEV のバージョンでこの問題はかなり解決されている模様である。

PC上で実行できるようにした PC-DYNEV (PC-based DYnamic Network EVacuation) が現在のバージョンである。また、より粗く、避難経路の選定、最適化のために使用される簡易な交通シミュレータ TRAD (Traffic Routing And Distribution) とともに I-DYNEV システムとして整備されている。ベースコードが FHWA の TRAFLO コードや CORFLO コードであるという点では、オークリッジ国立研究所 (ORNL) の OREMS コード²⁷⁾と解析機能の面ではほぼ同等であると考えられる。

上述したように、I-DYNEV あるいは PC-DYNEV、及び OREMS は、車列を小隊 (platoon) として交通流を表現し、ミクロとマクロの中間的な性格を持つメソ・シミュレータである。しかし、TRAFLO 等をベースにしていることから、交通流に異なる車種を混在させた取扱い(小型車と大型車、バスと工事用車両などの走行上の区別)については制限があるものと考えられる*。したがって、それを考慮しようとするれば車種ごとに解析を行う必要が生じる場合もあるものと思われる。実際、本節第(5)項で述べるように、KLD 社の ETE では、バスを使用した避難は通常の住民避難の ETE とは別に解析を行ない、バスを2台の小型車両に相当するものとして擬似的にモデル化して計算している。I-DYNEV で車種の区別ができない交通流モデルを用いていることが、バスによる避難の解析において、このような2台の小型車両に置き換える取扱い方をする理由ではないかと考えられる。

(4) ETE のシミュレーション解析数

上述したように、ETE の外的条件として、季節、平日/週末、昼/夜、天候、行事等の特殊設定がパラメータとして設定される。インディアンポイント原子力発電所の例では、表-7 に示すように 14 通りの条件を設定している。サウステキサス・プロジェクト原子力発電所では 12 条件である。

ETE は、上述した避難区域のパターンの各々について、この外的条件のパラメータに対して実施する。したがって、ETE は以下の解析数が行われている。

サウステキサス・プロジェクト原子力発電所；

避難区域パターン 22×外的条件 12=264 ケース

インディアンポイント原子力発電所；

避難区域パターン 35×外的条件 14=490 ケース

後述するように、ETE の最終的な解析数は、これに別途解析を行う、バスを使用した避難の分が加わる。

(5) 特殊施設に分類された住民の ETE 手法

学校の避難に関する ETE は、通常の住民避難の ETE とは別に解析を行う。それは、

* KLD 社の ETE レポートの PC-DYNEV の解説に、リンクやノードに車種別の階層を持つという記載があることから、現在では車種混合流の解析にもある程度適用できるよう改良されている可能性がある。

学校に関しては、避難は“サイト緊急事態”^{*}の段階で実施することが推奨されていること¹⁷⁾、及び、学校の授業時間帯に事故が発生した場合は、生徒達はバスによって事前に決められている収容施設の学校に直接移送されるからである。また、なお、第2.3節で述べたように、両親は、自分の子供を学校に迎えに行ってはならず、避難先の学校で引き合わされる³⁾。

学校と同様に、入院等で病院や老人ホームにいる住民もバスを使用して避難する。これも通常の住民避難の ETE とは別に行われる。

学校等の避難終了後、自家用車が無い、あるいは運転のできない世帯あるいは一時滞在者について、バスをあらかじめ決められたルートを巡回させて収容し、避難所に移送する。地域によって多少違いがあるものと思われるが、ETE レポートでは、学校等の避難に使用したバスを順次、自家用車が使えない住民等の移送に投入するシナリオで解析している。解析上、ルートの巡回は2度行われることですのでこれらの人々を移送完了できるとなっている。すなわち、通常の住民避難の ETE が一定方向の移動シミュレーションであるのに対して、このバスによる収容は循環するルートもしくは往復するルートを2回繰返すシミュレーションになっている。後述するように、我が国のように避難をバスで実施する場合、この解析手法の方が参考になるものと思われる。

なお、I-DYNEV 上では、バスは2台の車両としてモデル化されている。これは、前出の本節第(3)項で述べたように、I-DYNEV では車種の混在した状態は取扱えない交通流モデルを用いていることに起因している可能性がある。

(6) 避難の完了

KLD 社の ETE では、避難の完了確認時間として、避難対象区域の住民宅への電話調査に要する時間を評価、計上している。この電話調査は全戸数ではなく、サンプリング調査の方法を用いる。そのため、ETE レポートでは、統計学的に何件の電話調査を実施すれば十分な信頼性を持って避難完了の確認ができるか検討されている。

避難の完了確認を住民宅への電話調査によって実施する方法が実際に防災対応を行う現場で採用されているかどうかは、今回調査では確認できなかったが、FEMA は実際に地域を巡回し、全戸を確認しているものと思われる²³⁾。この電話調査による確認は、方法として非常に合理的ではあるが、我が国においては、むしろ消防団等の協力により一戸一戸確認する方法は変えずに、前出の新潟県柏崎市の原子力災害時避難誘導マニュアルに記載されている、各世帯で避難済の目印として白タオルを玄関等に表示する例のように¹⁾、地域における創意工夫によって合理化を図るほうが望ましいものと思われる。

* “サイト緊急事態”については前回調査報告書の「付録」を参照³⁾。

(7) 交通規制及び列車、船舶の運航に関する提言

KLD 社の ETE レポートには、ETE の解析に係わる手法の説明、使用データ及び結果だけでなく、避難に係わる交通規制の方法や及び列車、船舶、航空機の運航に関する提言が必要に応じて記載されている。

避難に関わる交通規制に関しては、基本的に発電所から外側に向かう交通流を優先する。交通規制のポイントは、米国の避難経路として基本的に高速道路が使われるため、高速道路のランプが選定されている。KLD 社が元々交通施策のコンサルティング会社であるため、ETE レポートに高速道路のランプ規制について非常に詳細な記載がなされているのが特徴的である。規制に該当するすべてのランプについて、コーンの設置の仕方と誘導員の配置、必要人員が図示されている。

列車の運航は直接 ETE には関係するものではない。しかし、インディアンポイント原子力発電所のケースでは、地区外からの通勤者の輸送を支援するため、避難勧告を発してから 1.5 時間は運転継続することを提言している。また、船舶については、原子力発電所が比較的大きな河川に隣接して建設されていることから、沿岸警備隊による域内退去の警告を実施することを提言している。

航空機の運航については、特にインディアンポイント原子力発電所においては、テロ対策の観点から大きな論争となった経緯があるが、ETE レポートには特に記載はない。これは原子力発電所の事業者はもちろん、州や群のような地方公共団体の管轄ではないためと考えられる。

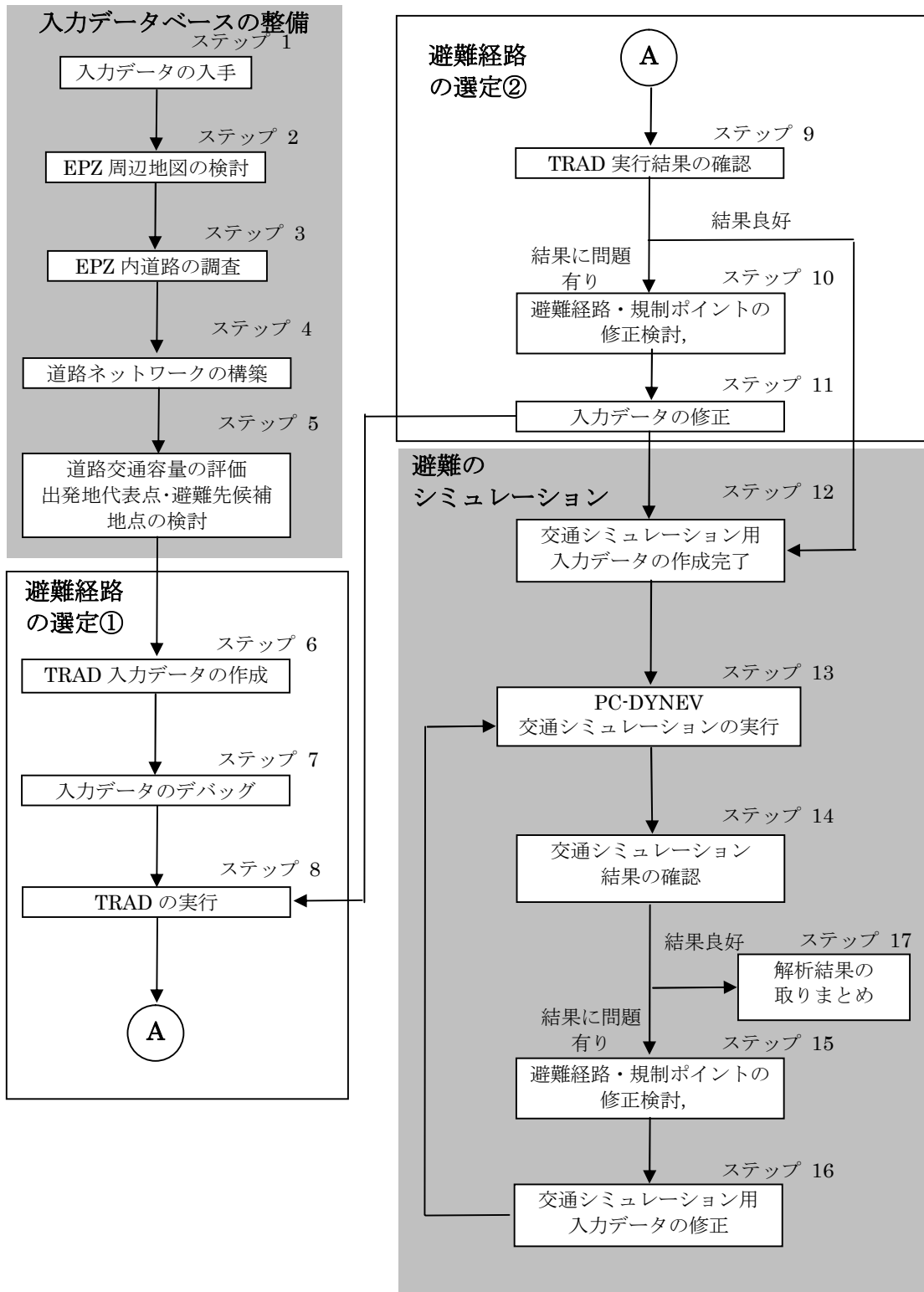


図-1 KLD 社の ETE 作業フロー(28,32,33,34,35)

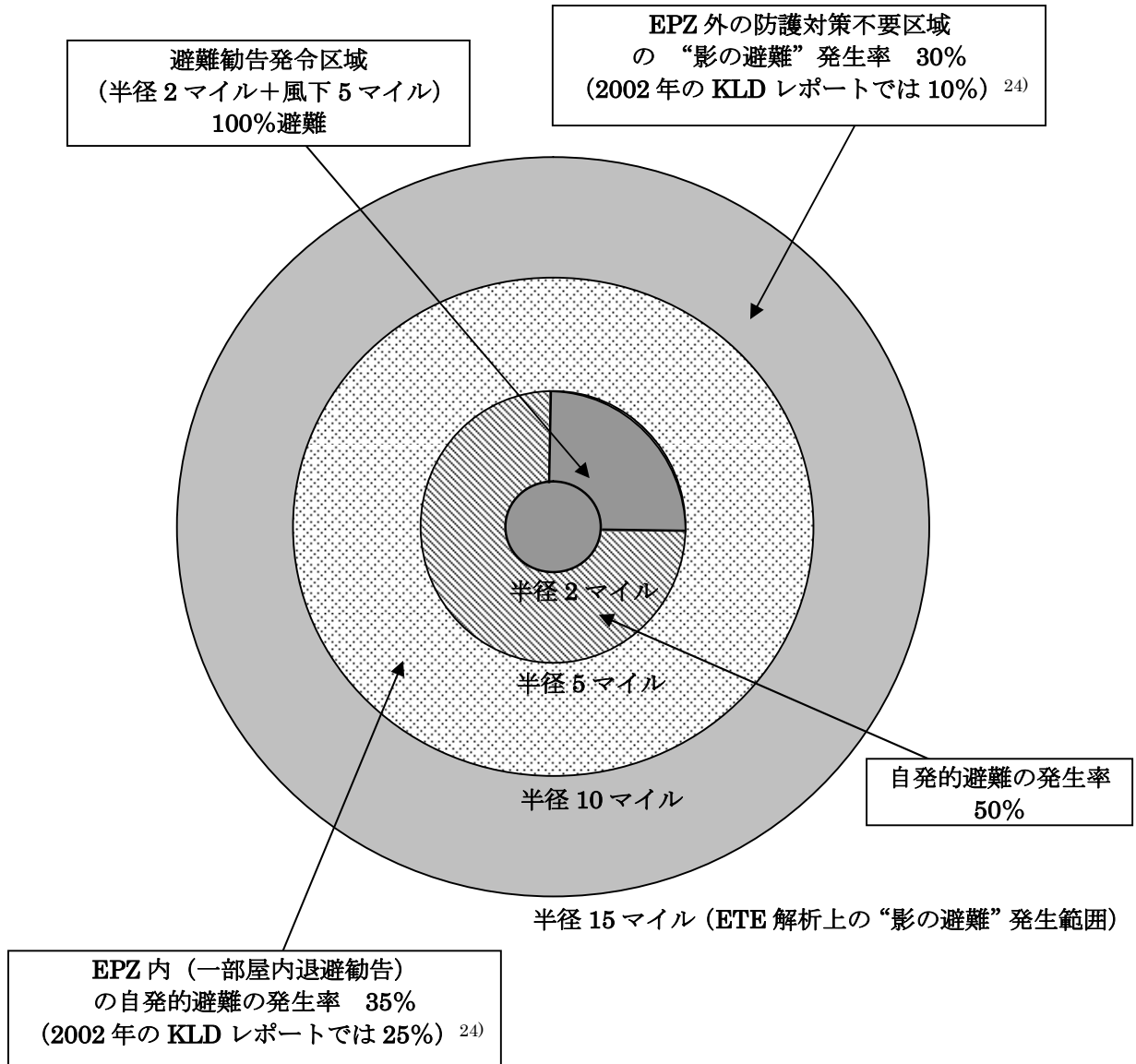


図-2 KLD 社の採用している避難時住民行動モデル^{28,32,33,34,35)}

表-3 原子力発電所の新規設置・運転継続申請における ETE レポートの実例

プラント名 ⁽¹⁾	事業者	ETE 実施者	文献及び発行年
Bellefonte Nuclear Plant, Units 3 & 4*	NuStart/ TVA ⁽²⁾	KLD Associates, Inc.	2007 ³²⁾
Indian Point Energy Center [#]	Entergy Nuclear	KLD Associates, Inc.	2003 ³³⁾
Millstone Power Station [#]	Dominion Nuclear Connecticut, Inc.	Earth Tech, Inc. ⁽³⁾	1997 ²⁴⁾
North Anna Power Station, Units 3**	Dominion Virginia Power	IEM, Inc. ⁽⁴⁾	2001/2006 ²⁶⁾
		KLD Associates, Inc.	2007 ²⁸⁾
South Texas Project Units 3 & 4**	South Texas Project Nuclear Operating Company	KLD Associates, Inc.	2007 ³⁴⁾
Vogtle Electric Generating Plant**	Southern Nuclear Operating Company	IEM, Inc.	2006 ²⁹⁾
William States Lee III Nuclear Station Units 1 & 2*	Duke Energy	KLD Associates, Inc.	2007 ³⁵⁾

(1) *は新規の原子力発電所サイト設置, **は新規のプラント増設, #は既存プラントの運転継続。

(2) NuStart Energy Development / Tennessee Valley Authority

(3) アース・テック社が作成した ETE レポートは入手できないため、ジェームス・リー・ウィット・アソシエーツ社の防災対策評価報告(2003 年)²⁴⁾に記載された全体概要を参照した。

(4) 2006 年の審査において、Dominion Virginia Power 社が提出した 2001 年版のレポート。翌 2007 年に KLD Associates 社が再評価を実施。

表-4 (1) ETE における各種モデルと使用データベースに関する比較

項 目	評価モデル・データベース	
	アース・テック社 (1994 年)	KLD 社 (2007 年)
住民人口	STP* ; 1990 年国勢調査 (3,040 人) IP* ; 2000 年国勢調査より約 10%低い (267,800 人)	STP* ; 2000 年及び 2005 年の国勢調査がわずかに減少傾向を示していることから, 2007 年の人口を 2000 年と同じと評価 (2,875 人) IP* ; 2000 年国勢調査のデータ(297,642 人)を基に 2003 年の人口を外挿予測 (305,276 人)
住民の車両保有数 (STP*)	平均 1 世帯あたり 2.5 台 1 人/避難車両と仮定	電話調査により, 2.38 人/世帯 1.43 台/世帯 1.66 人/避難車両
就業者の車両数	地区外からの通勤者を含めた就業者数より, 1 従業員/避難車両と仮定	2007 年の STP* では, さらに EPZ 内の主要企業の情報, 及び航空写真からの商業特性観察に基づき, 1.01 従業員/避難車両 2003 年の IP* では国勢調査のみを基にして推計。
EPZ 内からの自発的避難 ³⁾	考慮せず。	5 マイル以内の風下方向ではない地域で 50%, 5~10 マイルの屋内退避地域で 35%(図-1 参照)。
“影の避難” ³⁾	考慮せず。	EPZ より外側の 10~15 マイルの地域で 30%(図-1 参照)。
道路ネットワークの大きさ	STP* ; リンク 349, ノード 58 IP* ; リンク 598, ノード 398	STP ; リンク 574, ノード 389 IP ; リンク 2132, ノード 1031
道路の幾何学情報データ (STP*)	1994 年の現地調査	2007 年の現地調査。 道路交通容量については 2000 年の道路交通容量マニュアル(米国学術研究会議輸送研究委員会)を使用。
学校の避難	避難所(受入れ校)へ直接避難	避難所(受入れ校)へ直接避難
相乗り (STP*)	考慮せず。	地区外への通勤者の内の 50%が隣人や友人と自家用車の相乗り

*STP ; サウステキサス・プロジェクト原子力発電所³⁴⁾, IP ; インディアンポイント原子力発電所³³⁾

表-4 (2) ETE における各種モデルと使用データベースに関する比較

項 目	評価モデル・データベース	
	アース・テック社 (1994 年)	KLD 社 (2007 年)
地区外への通勤者がいる世帯	考慮せず。	電話調査により、以下の数を考慮。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 自家用車なしの世帯 ・ 帰宅しない通勤者が自家用車を使用している世帯 ・ 帰宅しない通勤者とは別に自家用車を所有している世帯
避難の交通流発生量(生成率)	避難勧告を発してから避難の移動を開始するまでの時間 <ul style="list-style-type: none"> ・ 定住及び別荘の住民； 30～150 分 ・ スクールバス； STP*；30～90 分 IP*；30～60 分 	電話調査により、避難勧告を発してからの以下の時間を考慮。 STP*； <ul style="list-style-type: none"> ・ 通勤者が帰宅してから避難する住民（該当世帯の 70%）；45 分～6 時間 ・ 帰宅する通勤者がいない住民；15 分～5 時間 ・ 地区外からの通勤者等の一時滞在者； 10 分～2 時間 IP*； <ul style="list-style-type: none"> ・ 通勤者が帰宅してから避難する住民（該当世帯の約 60%）；30 分～4 時間 ・ 帰宅する通勤者がいない住民；15 分～2.5 時間 ・ 地区外からの通勤者等の一時滞在者； 15 分～1.5 時間
交通規制	STP*；考慮せず。 IP*；29 箇所	STP*；全ケースについて、発電所から外側に向かう交通流を優先。 IP*；150 箇所
天候	良い、悪い、洪水発生の 3 通り	STP*；通常と雨天。 道路容量、自由走行速度、いずれも雨天時は 10%減、 IP*；上記に降雪時を加える。降雪時は 20%減（移動前に除雪することを考慮。）。 他地域では降雪時は 15%減としている。

*STP；サウステキサス・プロジェクト原子力発電所³⁴⁾、IP；インディアンポイント原子力発電所³³⁾

表-4 (3) ETE における各種モデルと使用データベースに関する比較

項目	評価モデル・データベース	
	アース・テック社 (1994 年)	KLD 社 (2007 年)
交通流シミュレータ	NETVAC	I-DYNEV システム (TRAD 及び PC-DYNEV)
考慮した特別なイベント	STP* ; 休日のピーク時 IP* ; USMA フットボール開催の週末	STP* ; 休日のピーク時及び新プラントの建設工事, IP* ; USMA フットボール開催 (週末) 及び陸軍士官学校卒業イベント
バスの利用	計画上の調達可能台数	計画上の調達可能台数
列車	STP* ; 該当せず IP* ; 考慮せず (ETE に関係なし)	STP* ; 該当せず IP* ; ETE に関係なし。しかし、地区外からの通勤者の輸送を支援するため、避難勧告を発してから 1.5 時間は運転継続することを提言する。
船舶, 航空機	STP* ; 該当せず IP* ; 船舶は沿岸警備隊による域内退去の警告。 航空機は考慮せず。	STP* ; 該当せず IP* ; 船舶は沿岸警備隊による域内退去の警告。航空機は考慮せず。
ETE 解析 (STP*)	35 通りの区域, 8 条件の計 280 ケースについて, 避難完了率 100% で整理。	22 通りの区域, 12 条件の計 264 ケースについて, 避難完了率 50, 90, 95, 100% で整理。
EPZ 全域避難 (STP*)	夏, 平日, 好天の条件 ; 3:00 夏, 週末, 好天の条件 ; 3:05	夏, 平日の日中, 好天の条件 ; 6:20(100%完了), 4:00(95%完了) 夏, 平日の日中, 天好の条件 ; 5:50(100%完了), 3:40(95%完了) KLD 社は避難計画において 95%完了時間の使用を推奨。

*STP ; サウステキサス・プロジェクト原子力発電所³⁴⁾, IP ; インディアンポイント原子力発電所³³⁾

表-5 ETE の避難地区パターン (サウステキサス・プロジェクト原子力発電所の例³⁴⁾)

避難区域のタイプ	避難区域パターン	避難区域の範囲・方向*	緊急時対応計画区域 (ERPA)												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
全方位	R01	全方位 2 マイル	○												
	R02	全方位 5 マイル	○	○	○	○	○								
	R03	EPZ 全域(10 マイル)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
全方位 2 マイル + 風下 5 マイル	R04	南東⇔南西	○			○									
	R05	南西⇔北西	○			○	○								
	R06	西⇔北北西	○				○								
	R07	西⇔東北東	○	○			○								
	R08	北⇔東北東	○	○											
	R09	北⇔南東	○	○	○										
	R10	東⇔南東	○		○										
全方位 5 マイル + 風下 10 マイル (EPZ)	R11	南⇔南西	○	○	○	○	○				○	○			
	R12	南⇔西	○	○	○	○	○				○	○	○		
	R13	南西⇔西	○	○	○	○	○					○	○		
	R14	南西⇔北	○	○	○	○	○					○	○	○	
	R15	西北⇔北	○	○	○	○	○						○	○	
	R16	西北⇔北東	○	○	○	○	○	○						○	○
	R17	北⇔北東	○	○	○	○	○	○							○
	R18	北東⇔東北東	○	○	○	○	○	○							
	R19	北東⇔南東	○	○	○	○	○	○	○						
	R20	東⇔南東	○	○	○	○	○			○					
	R21	東⇔南	○	○	○	○	○			○	○				
	R22	東⇔西	○	○	○	○	○			○	○	○			

* R04～R22 は風下方向の範囲。オリジナルの KLD 社の ETE レポートでは角度範囲で表記されているが、我が国では 16 方位名が一般的であるため、16 方位名に置き直した。R04～R10 と R11～R22 の方位設定は同等であるが、緊急時対応計画区域の区割りの関係で 16 方位名では若干の違いが生じる。

表-6 道路交通容量, 自由走行速度及び移動準備時間に対する天候影響のモデル

天候	好天時に対する値		
	道路容量	自由走行速度	移動準備時間
雨天	90%	90%	変化なし
降雪	85%	85%	インディアンポイント原子力発電所のケースでは、移動前に除雪作業が入ることを考慮する。 他の発電所では変化なし。

(引用文献 28,32,33,34,35 参照)

表-7 ETE の外的条件 (インディアンポイント原子力発電所の例³³⁾)

ケース	季節	平日/週末	昼/夜	天候	特殊設定
1	夏	平日	日中	好天	—
2	夏	平日	日中	雨天	—
3	夏	週末	日中	好天	—
4	夏	週末	日中	雨天	—
5	夏	平日, 週末	夜間	好天	—
6	冬	平日	日中	好天	—
7	冬	平日	日中	雨天	—
8	冬	平日	日中	降雪	—
9	冬	週末	日中	好天	—
10	冬	週末	日中	雨天	—
11	冬	週末	日中	降雪	—
12	冬	平日, 週末	夜間	好天	—
13	秋	週末	日中	好天	ウエストモント地区 フットボール開催
14	春	平日	日中	好天	ウエストモント地区 陸軍士官学校卒業イベント

4. 原子力緊急時の“即時対応”に係る住民避難計画策定上の課題

4.1 我が国における防災対策の観点からの PSA 研究の必要性

第2章で述べたように、調査を基にフランスの即時対応導入の背景を推定すると、フランスは、即時対応を必要とするような原子力発電所の重大な事故では、放射性物質の放出は早くても（6時間以内）、早期に復旧作業が完了できることが期待できるという前提があり、その放出継続期間は長時間に及ぶことはなく（48時間以内）、またその影響範囲は小さい（半径2km以内）ことから、まず“即時の屋内退避”によって放出される放射性物質の吸入を避け、放射性プルームの通過を待って当該住民の避難を実施することが十分可能であるという見通しを持って、この即時対応フェーズを導入したものと考えられる。

一方、前回調査の報告書³⁾で述べたように、米国では1996年にNRCはNUREG-0654補足文書3で、発生する確率が極めて小さいシビアアクシデントに対する、万一の防災対策として“即時避難”措置を導入した⁴⁾。2005年になってNEIは、当該事象の発生時には、事業者として地方政府に対しこの補足文書3の“即時避難”措置を推奨するとしてNEIガイダンスを発表している¹⁷⁾。

NUREG-0654補足文書3で即時対応を必要とするような事故への対処が必要であるとされた根拠は、いくつかの異なるタイプの軽水炉について実施されたNUREG-1150の確率論的安全評価（以下、「PSA」という。）である⁴⁸⁾。フランスにおける即時対応フェーズの導入の根拠となった具体的な研究論文や報告書は不明であるが、当時の原子力防護安全研究所(IPSN、現在のIRSN)のシビアアクシデントに関する研究がベースになっている。

我が国においては、原子力安全委員会の安全目標専門部会において、原子力発電所に係る安全目標に対応する性能目標について議論されている⁴⁹⁾。この議論は、原子力発電所の設計に係る性能目標を設定するためのもので、防災対策に係るものではないが、現在の我が国のPSA研究の知見として興味深い。

この安全目標専門部会では、リスクの源となる炉心に内蔵される放射性物質の放出をもたらす炉心損傷の発生確率である炉心損傷頻度(CDF: Core Damage Frequency)と格納容器の防護機能喪失の年当たりの発生確率である格納容器機能喪失頻度(CFF: Containment Failure Frequency)の2つを性能目標の指標とすることが合理的であると結論付けている。2つの指標は原子炉の性能目標という観点で選定されたものであるが、同様に防災対策の観点から、放射性物質の外部放出が起こる時間とその影響範囲に関して、整理することはできないものだろうか。

2008年2月14日付けでANSが公表した「事故に関する最終見解」に、パリュエル

*NRCのSECY-07-0225(2007年12月)⁴⁷⁾によると、米国で“即時避難”を導入したNUREG-0654、補足文書3の改訂が2009年度末の予定で進められている。改訂案では、“即時避難”からフランスの即時対応フェーズと同様な方向、すなわち、まず“即時屋内退避”によって放射性プルームの通過を待ち、その後に避難を実施するという対応、を優先するというものである。

(Paluel) 原子力発電所で原子炉格納容器の閉じ込め機能の一部喪失状態が 5 ヶ月間継続していたことが判明したという報告がある⁵⁰⁾。これは、定期検査において作業員が原子炉格納容器に連通している系を閉状態に保つためのバルブ操作を忘れていたことが原因であるが、このような状態が長期間続いていたという点が重要と思われる。

ANS の年報の記載によれば、放射性物質の放出をともなう原子力発電所の重大な事故の発生確率は非常に小さいものであるが、その中でも炉心損傷にともなう大規模な放射性物質の放出の確率は他の重大な事故よりも高いために、原子力防災の観点で重点的に対策がなされてきたとしている⁹⁾。それに対して、同年報では、原子炉格納容器のバイパス事象を伴って発生する放射性物質の放出のように、放射性物質の放出開始が比較的早い事故モードは、さらに発生する確率が小さく、かつ、影響範囲も小さいと述べている。

しかし、上述のパリュエル原子力発電所トラブルの例は、原子炉格納容器のバイパス事象を伴って放射性物質の放出が発生するような事故モードはきわめて発生確率は小さいとしても、それに対して防災対策が必要ないということではないということを示唆しているように思われる。そして、このような事故モードにおいては、事故の進展の早さと放射性物質の放出規模の点で、従来から重点を置いて防災対策の準備がなされてきた大規模な放射性物質の放出をともなう事故とは、防災上の対応の仕方が大きく異なることが非常に重要である。

2003 年に FEMA が、NUREG-0654 補足文書 3 の“即時避難”措置に関連し、早期破断事象 (fast-breaking events) を考慮し、緊急時通報ルールの見直し及びその判断基準、演習評価について検討したことがある⁵¹⁾。しかし、この新通報ルール導入はパブリックコメントの段階までの文献しか入手できない。このルールの策定と並行して、早期破断事象に関する判断基準書の作成等が実施されていたが、それがリリースされたという事実は、公開情報の範囲では確認できなかった。すなわち、FEMA のこの検討は、パブリックコメントまでの段階で中止となった可能性が高いものと考えられる。また、NRC が“即時避難”を導入した NUREG-0654 補足文書 3 の改訂を検討していることが 2007 年 12 月の NRC 委員会文書 (Commission Papers, もしくは SECY Papers と称される。) に記されている (前頁脚注参照)。同時に、NRC がサンディア国立研究所に委託したこの補足文書 3 のレビューレポートも発表された^{47,52)}。これらのことから、早期に進展する事故の評価については、米国でもさまざまな議論がまだ行われており、“即時対応”の方法についてもさらなる検討が継続されているもようである。

以上のように、原子力発電所の重大な事故に対する即時対応の必要性あるいはその性質の議論は、非常に専門的な PSA 研究の知見を必要とする。我が国においても、原子炉安全研究の専門家の知見を結集し、以下の点について、我が国としての見解をまとめていくことが期待される。

- ・ 防災対策として原子力発電所の重大な事故に対する即時対応が必要なかどうか、
- ・ また、その対応としてフランスのような事故の想定による“即時屋内退避”が妥当

であるか、

- ・あるいは、米国のように、事業所敷地外に影響が及ぶような重大な事故発生後の進展予測は困難であるとして“即時避難”とすることが必要なのか。

また、以上のような原子力発電所の重大な事故に関する知見をまとめていくことが、今後、IAEAのPAZへの対応を議論するうえで、最も重要なポイントでもあると思われる。

4.2 避難時間評価における留意事項

前回調査の報告で、原子力災害時の住民避難計画の策定において、ETEの必要性を指摘した³⁾。原子力災害において、特に防護対策の実施について“即時対応”が要求される事象に対応するためには、事前の住民避難計画策定において避難時間を把握しておくことが不可欠である。

ここでは、第3章で述べたETEで用いられる各種モデル及び計算法について、我が国で実施する場合に特にポイントとなる事項をまとめる。

原子力災害時にどれだけの人数が避難することになるのか。米国のETEレポートは、これが国勢調査データだけでは十分ではないことを示した。我が国の地域防災計画は、地区内外への通勤者に係る情報がある程度反映されており、また観光客等一時滞在者に関するデータも取りまとめられているものの、そのデータベースの作成基準が明確でなく、ETEを前提とした系統的な調査要領が確立されていないため、例えば避難時の交通需要を評価する観点から見ると、それがどのようなところまで考慮に入れられた数字であるのか、また地方公共団体の間で考え方や取扱い方に差異がないか、現状で確認することができない。

米国では避難者自身が自家用車で避難するため、特に地区外への通勤者に関連する家族の行動が重要であり、綿密な住民電話調査を必要としている。我が国ではこれほどの調査は必要ないと考えられるが、それでもETEは避難時の交通需要に非常に影響が大きいいため、避難時の行動等についても、ある程度の住民意識調査が必要であると思われる。

住民調査が特に必要となるのは、地域防災計画で想定されていない避難、すなわち“自発的避難”と“影の避難”の発生率に関わる情報である。この計画外の避難は、住民の意識に根ざしているため、米国のETEレポートのモデルを我が国にそのまま適用することはできないと思われる。例えば、1999年に茨城県東海村で発生したJCOウラン加工工場における臨界事故の際、東海村では大きな混乱も生じることなく、東海村住民が冷静に屋内退避の要請に従っていた点が注目された。しかし、東京大学の廣井らは、事故後の住民調査の結果に基づいて、この大きな理由として、原子力の歴史が長く、住民の原子力に対する理解、あるいは「覚悟」や「あきらめ」の度合いが比較的高い東海村で事故が発生したという点を指摘している⁵³⁾。したがって、我が国の場合は、このような計画外に発生する避難の発生率に非常に大きな地域差が存在している可能性があると考えられる。

ETEは、緊急対応計画の一環として実施される事前評価のひとつであるため、実際に

避難が行われるかどうかに係わらず、万一の場合を想定して十分余裕を持った範囲に対して実施しておく必要がある。そのために、第 3.2 節(2)項で述べたように、避難区域のパターンを作成しなければならない。我が国では、防災指針にも記載されているように、防災指針 EPZ は屋内退避の目安となる 10mSv の実効線量をベースに設定されていることから、防災指針 EPZ 全域を避難とする必要はない。しかし、防災指針には、フランスのように、防災指針 EPZ 内で避難の目安となる範囲が示されていない。そのため、ETE を実施する場合、米国のように防災指針 EPZ 全域を避難させるケースを想定した解析を行うか、避難計画上で最低限考慮しておかなければならない避難範囲を地域でそれぞれ独自に考える必要がある。このことは、即時対応を想定して避難実施要領をあらかじめ検討しておくとする地方公共団体においても同様の問題を提起する可能性がある。そのため、ETE のように事前に避難区域のパターンを検討しておくことを想定し、防災指針 EPZ 内で避難の目安となる範囲が防災指針等の中で示されることが望まれる。

交通シミュレーションについては、いくつか課題がある。

まず、道路交通容量、自由走行速度及び移動準備時間への天候の影響である。雨天時の道路交通容量及び自由走行速度の変化については、我が国においてもいくつかの研究報告がある。田島は、車両感知器による測定データを利用し、独自のマクロシミュレーションコードを用いた再現実験において、降雨量 1mm/h 以上で交通容量が 95%、5mm/h 以上で 85%に低下する見通しを示している⁵⁴⁾。日本大学の太谷は降雨と交通需要及び道路交通容量の関係を詳細に分析しているが、交通容量については 90~94%に低下し、直線部では雨量に依存し、1mm/h 以上で交通容量が 92%となり、特に曲線部ではさらにその影響が大きくなることを示した⁵⁵⁾。また、Chung ら首都高速道路上の交通量をもとに交通容量と自由走行速度の影響を分析し、自由走行速度で走行できる状況では降雨の影響はほとんど見られないが、車両密度の高い状況では降雨時に 4.4~6.3%交通容量が低下することを示した⁵⁶⁾。国内のこれらの報告は、いずれも首都高速道路等の高速道路を対象とした研究であり、道路環境としては比較的良好なケースである。米国では非常に幹線道路網が発達しており、また、ほとんどの幹線道路（ハイウェイ）の道路条件は我が国の高速道路と同等である。都市近郊では、（片側 5 車線という例があるように）車線が多く広いため、むしろ我が国よりも、条件は良いことが予想される。KLD 社の ETE レポートの解析モデルは、このことを踏まえて見る必要がある。我が国において原子力災害時の避難を考える場合、もっと狭く、屈曲が多い道路条件のケースが多く、天候が道路交通容量及び自由走行速度に与える影響は、さらに大きいことが予想される。今回の調査では、国内の一般道に関する天候と道路交通容量及び自由走行速度の関係を研究した文献は入手できなかった。上記のようなことから、米国に比較して、我が国においては一般道に関する交通の研究の重要度がより大きいと考えられる。また、降雪時の影響に関する文献は、今回調査では入手できなかった。今後さらに調査を実施する必要がある。

次に ETE に使用する交通シミュレータの選定である。

米国とは、原子力発電所の立地環境や実施方法そのものが異なる我が国の避難については、ETEにおいて交通シミュレータの必要性があるかどうかの検討が必要であることは、前回調査の報告書で指摘した³⁾。ここでは、我が国の ETE において交通シミュレータを適用する必要があると考えた場合、どのようなシミュレータが有望であるか検討する。

我が国で開発された交通シミュレータの多くはマイクロシミュレータである。それは、これまでの交通シミュレーションの国内のニーズが、交差点設計や大型店舗、あるいは駐車場設備の設計といった道路施策や都市計画の検討に限られていたことによる。表-8 に交通工学研究会が紹介する国内で一般に利用が可能な公開の交通シミュレータを示す⁵⁷⁾。前回調査の報告書でも指摘したように³⁾、原子力災害時の避難に関して適用する場合は検証済みの交通シミュレータを適用することが必要である。交通シミュレータの検証には、使われているモデルの基本検証(verification)とシミュレータとしての実用検証(validation)の2種類がある^{58,59)}。表-8 に示した交通シミュレータはすべてモデルの基本検証が行われている。マクロシミュレータに関して実用検証が行われている例は少なく、今回の調査で確認した範囲では、花房らの AVENUE の報告がある⁶⁰⁾。なお、交通工学研究会によれば、モデルの複合検証マニュアル及びベンチマークデータセット整備マニュアルが現在策定作業中であるとのことである⁵⁸⁾。

最近、台風の洪水にともなう避難や地震発生時の避難について、交通シミュレータを適用して検討する研究が国内においても行われてきている。しかし、洪水にともなう避難は河川等の河岸近傍の狭い範囲である例が多い。また、地震の場合は道路等のインフラの破壊による影響が大きく、それに着目した避難の研究が多い。原子力災害時では、半径 10km を越える広域が解析対象となり、大量の移動需要(避難者)が一時に発生するが、道路等のインフラはほとんどのケースで無傷であり、また多くの場合、緊急事態に至る以前の段階で交通規制を実施することによって交通環境は比較的よいことが特徴である。

前回調査の報告書でも述べたように、我が国でも原子力災害時の避難に関して交通シミュレータを適用した研究例があるが、交通流を流体として取扱う古典的なマクロシミュレータを使用している³⁾。前述したように、流体モデルやメソ・シミュレータは車種を区別して扱うことがむずかしく、また運転者が行う車線変更の影響は考慮できないという難点を持っている。しかし、1971年に我が国の交通工学研究会がブロック密度法というメソ・シミュレータに代わる交通シミュレーションモデルを開発している⁶¹⁾。これは、さらに東京大学生産技術研究所を中心としたグループによってハイブリッドブロック密度法という高度化モデルに改良され、車両1台ごとの走行を再現することもできる点でマイクロシミュレータに近い機能を有するもので、1993年に実用化されている⁶²⁾。ブロック密度法もしくはハイブリッドブロック密度法は、車列をブロック化して取扱う点ではメソ・シミュレータと似ており、マイクロとマクロの中間的な性格を持つが、ブロックにさまざまな特性を割り付けることが可能で、その一例が車種とその走行上の相違の反映である。ひとつの交通流に、軽自動車、普通車、バスのような大型車等を混在した条件で解析できる点は、

避難車両としてのバスと、前述した“自発的避難”あるいは“影の避難”の一般車両が混在し得るケースを評価できる点で有利であると考えられる⁶³⁾。

ブロック密度法及びハイブリッドブロック密度法を用いた交通シミュレータは、2000年以降、国内のアイ・トランスポート・ラボ社に引き継がれ、前者のブロック密度法をベースに広域解析向けのシミュレータとして SOUND/4U が、後者のハイブリッドブロック密度法をベースに、渋滞の発生等についてより精密な解析ができるシミュレータとして AVENUE が実用化されている^{64,62)}。SOUND/4U は首都高速道路網のほぼ全域を解析できる能力を持ち、原子力災害時の広域の避難にも十分適用できる可能性がある。しかし、これまで避難の解析に適用された実績はなく、特に一般道を中心とした広域避難への適用については、試験解析等による適用性評価、確認が必要であると思われる。

表-8 国内の交通シミュレータ（検証結果公開モデル）⁵⁷⁾

シミュレータ名	開発者（国内代理契約者）
マクロ（メソ）シミュレータ	
AVENUE *	アイ・トランスポート・ラボ
NETSTREAM	豊田中央研究所
SOUND/4U	東京大学, アイ・トランスポート・ラボ
SOUND/P	松下電器, アイ・トランスポート・ラボ
マイクロシミュレータ	
AIMSUN	カタルーニャ大学（スペイン）, ユーデック
NETSIM	FHWA（米国）, 北海道大学, フェニックスリサーチ
REST	鹿島建設
Simr	北海道開発土木研究所, パシフィックコンサルタンツ
SIPA **	国土技術政策総合研究所
TRAFFICSS	日立製作所
tiss-NET	埼玉大学
VISITOK	流通科学大学, VISITOK 研究会
WATSim	KLD（米国）, ユーデック

* AVENUE はメソ・シミュレータに相当するが、車両 1 台ごとの走行を再現できるのでマイクロシミュレータ相当の機能を有する。

** シミュレータのエンジンとして SOUND/A-21(シミュレータエンジンとしては SOUND/4U と同等)も組合せていることにより、マクロシミュレータのように広域解析にも適用可能である⁵⁷⁾。

5. まとめ

原子力緊急時の住民避難計画策定に関する前回調査に引き続き、

- ① フランスの即時対応と避難の方法、
- ② 避難時間評価に用いる各種評価モデルに関する事例調査、

の2点について、公開資料を中心とした調査を実施した。

フランスの即時対応と避難の方法に関しては以下の知見を得た。

- ・フランスの即時対応は、原子力発電所における事故発生時において、6時間未満のうちに放射性物質放出の危険性があるかどうかをプラントの状態から判断し、該当する状態であれば、事故進展予測等の解析や環境モニタリング等を行うことなく、ただちに半径2km以内に屋内退避を実施し、その後、放射性プルームの通過を待って避難を実施する。
- ・フランスの即時対応は、原子力発電所の重大な事故に対して、事故進展の早い事故においては、放射性物質の放出継続は短く、放出量も限られるという見通しに基づいて導入されたものと考えられる。
- ・我が国においても、原子炉安全研究の専門家の知見を結集し、即時対応の必要性、あるいはフランスのような“即時の屋内退避”の妥当性について、見解をまとめることが期待される。
- ・フランスの即時対応には、少なくとも屋内退避の対象となる半径2km以内の住民への安定ヨウ素剤の事前配布が求められる。したがって、これが困難な場合は、米国のように“即時避難”の措置をとる必要があるであろう。我が国においては、原子力発電所の周辺住民への安定ヨウ素剤の事前配布は行っていない。この場合には、米国のような“即時避難”の措置が妥当と考えられる。
- ・コンクリート屋内退避は、住民が徒歩ですぐに移動できる適切な施設が確保できる地区に限定する必要がある。また、もし避難ができる時間的な余裕があるのであれば、早期に屋内退避を解除できる確証がない限り、コンクリート屋内退避よりも避難を優先すべきと考えられる。
- ・フランスの避難は、我が国と同様に、地方公共団体が用意するバスを使用するが、再集結場所（救護所）は屋内退避の目安となっている10kmの外側の施設を選定している。我が国においても、救護所あるいは避難所を防災指針EPZの範囲外に設置することが望ましい。
- ・フランスでは、再集結場所からさらに最寄りの宿泊センター（避難所）バスを使って輸送する。再集結場所は避難者の確認、汚染のサーベイ、医療チェックを実施するところで、宿泊センターとは別の施設が選定される。我が国においても、救護所と避難所は分離する方が望ましいと考えられる。
- ・防災指針EPZの外側に救護所あるいは避難所を設置することは、市町村の境界を越えた対応が必要となり、道や県の主導的な役割が重要である。

避難時間評価に関する事例調査に関しては以下の知見を得た。

- ・特に時間がクリティカルとなるような事態の下での屋内退避あるいは避難の選択においては、

EPZ内のどこまでが事故の影響範囲となるのかという判断、そして放射性物質の放出前に当該範囲内の住民避難が完了できるのか否かの判断が必要であり、当該地区の“避難に要する時間”が非常に重要なキーファクターとなるため、事前に評価しておくことが不可欠である。

- ・ ETE は、外的条件のパラメータとして、季節、平日／週末、昼／夜、天候、及び人々が集中する行事等を考慮して避難時の交通需要を評価し、解析ケースを設定しなければならない。
- ・ ETE を実施するためには、あらかじめ防災指針 EPZ 内にさまざまな風向を想定して避難区域のパターンを作成しておかなければならない。
- ・ 避難区域パターンの設定においては、気象条件の不確かさを考慮して、風下3方位に限定することなく、風下の方位をより幅広く想定したケース及び全方位といったケースも解析すべきパターンの中に入れておく必要がある。
- ・ ETE を実施する場合、避難区域パターンの設定においては、防災指針 EPZ 全域を想定する必要はない。しかしながら、我が国では、防災指針 EPZ 内で避難の目安となる範囲が示されていない。ETE のように、避難の実施パターンを事前に検討し、準備しておく観点から、今後防災指針 EPZ 内で避難となる範囲の目安が防災指針等の中で示されることが望まれる。
- ・ 原子力災害時に実際に避難させなければならない人数は、国勢調査データだけでは不足であり、住民や観光客等一時滞在者の行動をある程度詳細に把握する必要がある。特に避難対象地区内の通勤者とその世帯の行動が重要である。ETE を実施するためには、この避難者の人数評価データの作成基準、あるいは系統的な調査要領を確立し、地方公共団体の間で考え方や取扱い方に差異が発生しないようにすることが必要である。
- ・ 地域防災計画で想定されていない避難、すなわち“自発的避難”と“影の避難”の発生は、ETE に重要なファクターであるが、我が国に米国のモデルをそのまま適用することはできない。我が国の場合は、このような計画外に発生する避難の発生には大きな地域差が存在する可能性があり、各地域において住民の意識調査を実施しておく必要がある。
- ・ 道路交通容量、自由走行速度及び移動準備時間への天候の影響は、米国及び国内の研究は高速道路を対象としたものであるため、我が国において ETE を実施するためには、“一般道に関する交通の天候影響”に関する調査あるいは研究が重要である。
- ・ 我が国において ETE を実施する場合、交通シミュレーションまで必要かどうかは検討の余地がある。しかし、人口の大きい地区においては、交通シミュレーションを利用しなければならない可能性が高い。
- ・ ETE において交通シミュレータを使用する場合、検証済みの交通シミュレータを適用することが必要である。我が国で開発された交通シミュレータは、ETE への適用において、米国で使われているシミュレータに優るとも劣らない機能を有するが、実際に一般道を中心とした広域避難への適用例がないため、試験解析による適用性の評価が必要である。

謝 辞

本調査におけるフランスの特別介入計画（PPI）の入手ならびにオフサイト緊急時対応に係る情報収集については、日本原子力研究開発機構国際部の仙石盛夫パリ事務所長及びパリ事務所スタッフの方々に大きな御協力をいただきましたことに深く感謝いたします。また、(株)アイ・トランスポート・ラボの堀口良太氏には、交通シミュレーションの避難への適用について多くの御助言及び示唆をいただきましたことに深く感謝いたします。

引用・参考文献

- [1] 柏崎市：原子力災害時避難誘導マニュアル，新潟県柏崎市，(2006).
- [2] International Atomic Energy Agency, et al.: Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA Safety Requirements GS-R-2 (2002).
- [3] 山本一也：“原子力緊急時の住民避難計画の策定に関する調査”，JAEA-Review 2007-035 (2007)
- [4] Nuclear Safety Authority: Annual Report 2006 – Nuclear Safety and Radiation Protection in France – (2007)
- [5] International Atomic Energy Agency, IACR/IAEA: CONVEX-3 (2005) Exercise Report, IAEA, Vienna, (2005)
 なお，IAEA のCONVEX-3 (2005)については，以下の調査報告がある。
 山本一也：“IAEA 国際緊急時対応演習ConvEx-3に関する調査”，JAEA-Review 2007-021 (2007)
- [6] U.S. Nuclear Regulatory Commission: Criteria for Preparation and Evaluation of Radiological Emergency Response Plans and Preparedness in Support of Nuclear Plants; Criteria for Protective Action Recommendations for Severe Accidents, NUREG-0654/FEMA-REP-1, Rev. 1 (1980).
- [7] R. B. Goldblatt: Evacuation Planning: A Key Part of Emergency Planning, 83rd Annual Meeting Transportation Research Board, Washington D.C., USA (2004)
- [8] Ministre de l'intérieur: Circulaire interministérielle du 10 mars 2000 portant révision des plans particuliers d'intervention relatifs aux installations nucléaires, (2000)
- [9] Nuclear Safety Authority: Annual Report 2000 – Nuclear Safety and Radiation Protection in France – (2001)
- [10] Préfecture de Loir-et-Cher; Plan particulier d'intervention - centre nucléaire de production d'électricité de Saint-Laurent des Eaux, ドラフト最終版(2002)
- [11] Préfecture de la région Aquitaine: 「Le dossier départemental des risques majeurs (DDRM)」サイトの「Le Plan Particulier d' Intervention du CNPE du BLAYAIS」, (online)
 <http://www.aquitaine.pref.gouv.fr/politiques/securite/civile/ddrm/ddrm_nucleaire.asp#top>
- [12] E. Raimond: “Current activities on accident consequences analysis at IRSN”, NRC 19th Annual Regulatory Information Conference (RIC 2007), North Bethesda, March 13 – 15 (2007)
- [13] Préfecture de la Manche ; Plan particulier d'intervention de la Hague, (1992)
- [14] International Atomic Energy Agency, et al.: Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA Safety Guide GS-G-2.1 (2007).

- [15] U.S. Environmental Protection Agency: Manual of Protective Action Guides and Protective Actions for Nuclear Incidents, EPA 400-R-92-001, (1992).
- [16] Belgian Nuclear Research Centre (SCK•CEN): A European Manual for 'Off-site Emergency Planning and Response to Nuclear Accidents', SCK CEN Report R-3594, (2002)
- [17] Nuclear Energy Institute: Range of Protective Actions for Nuclear Power Plant Incidents, NEI guidance (2005) 本資料は下の文献[18]に全文が転載されている。
- [18] U.S. Nuclear Regulatory Commission: Endorsement of Nuclear Energy Institute (NEI) Guidance –Range of Protective Actions for Nuclear Power Plant Incidents, RIS 2005-08, USNRC, Washington, DC (2005).
- [19] 原子力安全委員会：原子力施設等の防災対策について，2007年5月
- [20] 日本原子力研究開発機構 パリ事務所；私信 (2008)
- [21] (財)自治体国際化協会：フランスの地方自治，(2002)
- [22] Préfectures du Gard de Vaucluse; Plan particulier d'intervention - Site Nucléaire de Marcoule, (2002)
- [23] Federal Emergency Management Agency: Guide for All-Hazard Emergency Operations Planning-State and Local Guide, SLG 101 (1996)
- [24] James Lee Witt Associates: Review of Emergency Preparedness of Areas Adjacent to Indian Point and Millstone (2003)
- [25] Y. Sheffi, W. Powell, H.S. Mahmassani and B. Klimm: NETVAC 2: User's Manual, HMM Associates, Lexington, MA (1982)
- [26] IEM, Inc.; Evacuation Time Estimates for the North Anna Power Station and Surrounding Jurisdictions, (2001)
本資料は，Dominion; North Anna Early Site Permit Application, Rev 9,(2006)のEmergency Planの付属文書として引用されている。
- [27] A.K. Rathi: A microcomputer based traffic evacuation modeling system for emergency planning application, Oak Ridge National Laboratory, Submitted to the U.S. Department of Energy (1994)
- [28] KLD Associates, Inc.; North Anna Power Station: Development of Evacuation Time Estimates, KLD TR-420 (2007). これは，Dominion; North Anna Unit 3 Combined License Application - Part 5 Emergency Plan, Rev. 0 (2007)の付属文書として添付されている。
- [29] U.S. Nuclear Regulatory Commission: Development of Evacuation Time Estimate Studies for Nuclear Power Plants, NUREG/CR-6863 (2005).
- [30] IEM, Inc.; Evacuation Time Estimates for the Vogtle Electric Generating Plant, (2006)
これは，Southern Nuclear Operating Company: Early Site Permit Application for the Vogtle Electric Generating Plant, Part 5 – Emergency Plan,の付属文書，AR-06-1721

- Enclosure 10 として添付されている。(2007)
- [31] Klaus Nökel; VISUM 10- Status and Perspectives, PTV AG report (2007),
(online) <www.ptvamerica.com>
- [32] KLD Associates, Inc.; Bellefonte Nuclear Plant: Development of Evacuation Time Estimates, KLD TR-410 (2007) これは, Tennessee Valley Authority: Bellefonte Nuclear Plant, Units 3 & 4 Combined License Application - Part 5 Emergency Plan, Appendix 4, Revision 0 (2007) の付属文書として添付されている.
- [33] KLD Associates, Inc.; Indian Point Energy Center: Development of Evacuation Time Estimates, KLD TR-369 (2003)
- [34] KLD Associates, Inc.; South Texas Project: Development of Evacuation Time Estimates, KLD TR-415 (2007) これは, South Texas Project; Units 3 & 4 Combined License Application - Part 5 Emergency Plan, Appendix 4, Revision 0 (2007) の付属文書として添付されている.
- [35] KLD Associates, Inc.; William S. Lee Nuclear Station : Development of Evacuation Time Estimates, KLD TR-407 (2007) これは, Duke Energy: William States Lee III Nuclear Station Units 1 & 2 Combined License Application - Part 5 Emergency Plan, Appendix 4, Revision 0 (2007) の付属文書として添付されている.
- [36] R. B. Goldblatt and K. Weinisch: Evacuation Planning, Human Factors, and Traffic Engineering: Developing Systems for Training and Effective Response, Transportation Research Board, TR NEWS, 238, p.13 (2005)
- [37] U.S. Nuclear Regulatory Commission: Benchmark Study of the I-DYNEV Evacuation Time Estimate Computer Code, NUREG/CR-4873, (1988)
- [38] (社) 交通工学研究会 編 : 交通容量データブック 2006 (2007)
- [39] U.S. Nuclear Regulatory Commission: Identification and Analysis of Factors Affecting Emergency Evacuations, NUREG/CR-6864 (2005)
- [40] (社) 交通工学研究会 編 : 交通シミュレーション適用のススメ, (2004)
- [41] P. Sattayhatewa and B. Ran: Developing a dynamic traffic management model for nuclear power plant evaluation, the 79th Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting, Washington DC, January (2000)
- [42] E.C.P. Chang: Traffic Simulation for Effective Emergency Evacuation, EDCPC. ORNL 03/2003, (2003).
- [43] Post, Buckley, Schuh & Jernigan, Inc. (PBS&J); Southeast United States Hurricane Evacuation Traffic Study, NOAA Coastal Services Center Library (2000)
- [44] PBS&J; Southeast United States Hurricane Evacuation Traffic Study - Evacuation Traffic Information System (ETIS) Training Document (Draft), (2000)
- [45] F. Southworth: Regional Evacuation Modeling: A State-of-the-Art Review, ORNL-TM-11740 (1991)

- [46] U.S. Nuclear Regulatory Commission: Criteria for Preparation and Evaluation of Radiological Emergency Response Plans and Preparedness in Support of Nuclear Plants - Criteria for Protective Action Recommendations for Severe Accidents, NUREG-0654/FEMA-REP-1, Rev. 1 Supplement 3 (1996).
- [47] U.S. Nuclear Regulatory Commission: Revision of NUREG-0654, SUPPLEMENT 3, “Criteria for Protective Action Recommendations for Severe Accidents,” SECY-07-0225, December 29, (2007)
- [48] U.S. Nuclear Regulatory Commission: Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants, NUREG-1150, Vol. 1～3 (1990, 1991).
- [49] 原子力安全委員会 安全目標専門部会；発電用軽水型原子炉施設の性能目標について－安全目標案に対応する性能目標について－，(2006).
- [50] Centrale nucléaire de Paluel; Risque de perte de confinement en cas d'accident, AVIS D'INCIDENT, 14 février 2008 (online)
<<http://www.asn.fr/sections/rubriquesprincipales/actualites/avis-d-incident/2008/risque-perte-confinement-en-cas-d-8217>>
- [51] Federal Emergency Management Agency; Radiological Emergency Preparedness: Planning and Preparing for a Fast-Breaking Event, Federal Register, Vol. 68, No. 160-49783 notice with request for comments, Tuesday, August 19, (2003)
- [52] U.S. Nuclear Regulatory Commission: Review of NUREG-0654, Supplement 3, “Criteria for Protective Action Recommendations for Severe Accidents”, NUREG/CR-6953 Vol. 1 (2007)
- [53] 廣井脩，三上俊治，田中淳，他：1999年JCO臨界事故における情報伝達と住民の対応，東京大学社会情報研究所報告書，第3章（2000）
- [54] 田島 明；渋滞状況の変化を考慮した所要時間予測情報提供に関する研究，JICE REPORT Vol.6 11月（2004）
- [55] 大谷 修；気象条件を考慮した交通現象に関する研究，日本大学理工学部社会交通工学科，2004年度修士論文（2005）
- [56] E. Chung, O. Ohtani and M. Kuwahara: Effect of Rainfall on Travel Time and Travel Demand, 5th ITS European Congress, (2005)
- [57] (社)交通工学研究会：交通流シミュレーションクリアリングハウス，
(online) < <http://www.jste.or.jp/sim/index.html> >
- [58] (社)交通工学研究会：モデルの基本検証(verification)マニュアル，
(online) < <http://www.jste.or.jp/sim/manuals/index.html> >
- [59] (社)交通工学研究会 交通シミュレーション自主研究委員会：交通流シミュレーションの標準検証プロセス (Verification) マニュアル(案)，第2版，(2002)
- [60] 花房 比佐友，吉井 稔雄，堀口 良太，他；交通シミュレーション再現性検証用データセットの構築，土木学会 vol.688, p115 (2001)

- [61] (社) 交通工学研究会 編：やさしい交通シミュレーション, (2000)
- [62] 堀口良太, 片倉正彦, 赤羽弘和, 桑原雅夫：ハイブリッドブロック密度法を用いた都市街路網の交通流シミュレータの開発：AVENUE, 土木学会第 49 回年次学術講演会第 IV 部門論文集, (1994)
- [63] 堀口良太：私信 (2006)
- [64] 玉本学也, 堀口良太, 桑原雅夫：交通シミュレーション SOUND の大規模ネットワークへの適用, 第 30 回土木計画学研究発表会(秋大会)講演論文集, (2004 年)

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位		記号
	名称	記号	
面積	平方メートル	m ²	m ²
体積	立方メートル	m ³	m ³
速度	メートル毎秒	m/s	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m	A/m
(物質質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)			K
光照射 (放射性核種の)放射能	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
吸収線量, 質量エネルギー当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・m ⁻² ・cd=m ² ・cd
	シーベルト	Sv	J/kg	s ⁻¹

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度mのようにSI接頭語を併せて用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎メートル毎ケルビン	J/(m・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1 °=(/180) rad
分	'	1'=(1/60) °=(/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49) × 10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10) × 10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30) × 10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム		1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≙ 10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≙ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7 × 10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58 × 10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002 × 10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2 × 10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.184 J
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

