

東日本大震災、福島原子力発電所勉強会 安教授 講義録 2011年3月19日 (午後3時より)

2011年3月11日 東日本大震災後の東京電力福島第一原子力発電所

- 何が起きているのか？
- どう理解すればいいのか？

by Prof. Joonhong Ahn (UC Berkeley) with Prof. Shinya Nagasaki (Univ of Tokyo)

於：UC Berkeley Haas Business School Building C230

————犠牲者の方のご冥福を祈り、参加者全員起立、黙祷————

Section 1: Introduction

ゲスト紹介：

- いろいろな情報が錯綜している状況である。もう一人ご紹介したい。東京大学原子力専攻の長崎晋也先生。質問で困ったら長崎先生に。東京大学が数年前からGCOEという文科省のプログラムでUCBと協力関係を続けている。原子力工学だけではなく社会など複合的なことを考えていこうというプロジェクト。毎年リエゾンが来ていて今年は寿楽浩太さんと社会学が専門。今日は東京大学からのメンバーもここに来てくれているので心強い。

自己紹介：

- 1995年1月にこちらに来た。最初の講義の日が神戸の地震だった。
- 私の弟が神戸大学の医学部で精神科の医者をして、ボランティアの人とネットワークをつくって精神医療の活動をしていた。震災の経験をもとに『心の傷を癒すということ』という本を書いて、数年後になくなった。本はサントリー学芸賞をいただいている。今回起きていることは目に見えていることだけでも甚大だが、その後に起きることの深さ、甚大さというのはますます大きい。心しなければならぬ。
- 私が、東京大学で79年に3年生になって原子力工学の勉強を始めた年に、スリーマイル島の事故が起きた。博士号を取ろうかというときにチェルノブイリの事故が起きた。
- それ以来、30年原子力をやっているが、こういう事態になって自分も正直何か間違っていたと思わざるを得ない。しかし、知識を持っている者として話さないといけないと思った。
- 弟の本の中で書いていたことを言うと、debriefingは重要である。我々は遠く離れていても精神的ストレスがたまっているのだから、現地はどれほどかと思う。今日も、お互いに思いのたけをいろいろ話していただいて、共有できることがあればと考えている。我々の間で「頑張ろう」というのはいいが、被災地の人に「頑張ろう」という言葉はかけない方がいいということが、神戸の教訓としても心理学の知見ではいわれている。

- (編注 : A **debriefing** or *psychological debriefing* is a one-time, semi-structured conversation with an individual who has just experienced a stressful or **traumatic event**. In most cases, the purpose of debriefing is to reduce any possibility of psychological harm by informing people about their experience or allowing them to talk about it, from wikipedia.)

Q (講義の後の質問) 「頑張れ」という言葉をかけてはいけないのはなぜですか？

A 被災者はすでに、自分でも気がつかないくらいの精神的緊張状態でがんばっています。外部の人からは到底理解し得ない、という思いも強くあります。そういうときに、被災していない外部の人から軽々に「がんばってください」といわれると、これ以上、何をどうがんばればいいのか、という反発、まだ足りないのか、という自責の念、無邪気な善意に答えなければいけないという気配り(ほとんど強迫観念的)というようになり、決して励ましにはなりません。外部の人ができるのは、被災者の話をじっくりと聞くこと、暖かい寝場所と食べ物を用意すること、です。マスコミが喧伝しているような「復興」という言葉も被災者には自分を取り残して世の中が先に進んでいくというように受け止められます。神戸の地震のあと、マスコミであれだけ心のケアなどといっていたのに、非常に無神経な用語が多くて、それを見るたびに被災者が深く傷ついているだろうと思い、心配しています。紹介した本は、安克昌『心の傷を癒すということ』作品社、ですが、角川ソフィア文庫からも出ていました。今は在庫切れになっていますが、アマゾンで古本を見つけられると思います。

Section 2: Earthquake Review

- 東日本大震災の発生 (スライド 4)
- マグニチュード、震度 (スライド 5-7)
- 3つの波が顕著に見える (スライド 8)

Aftershocks:

http://www.msnbc.msn.com/id/42037498/ns/world_news-asia-pacific/

Before and After the Tsunami

<http://www.abc.net.au/news/events/japan-quake-2011/beforeafter.htm>

Q 長野、静岡の地震には関係するのか？

A 偶然と気象庁は発表しているが、続けておきている。地震専門家は考え直す必要があるだろう。(鈴木)

Section 3: 日本の原子力

スライド 13 : 日本における原子力発電の現状

- 合計設備容量は大体アメリカの半分くらいである。

Q 日本の原発で一番古いものはいつ頃のもののか？

A 一番古いものは廃炉になった。現時点で動いているものは1970年頃以降のものである。

- 福島だけで、第一原発・第二原発を併せて10基設置されている。さらに福島では新たに2基建設しようとして計画中だった。
- 今回の地震でも、女川や東海村は大丈夫だった。
- 青森県六ヶ所村には再処理工場、ウラン濃縮工場、低レベル放射性廃棄物埋設センター、高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センターがある。六ヶ所村も太平洋側に面しているが、やや内陸部にあったので難を免れた。

Section 4: 原子炉

スライド 16-18 : 元素と同位体について

- UCサンタバーバラの先生のスライドから。自然界にはたくさんの同位体・元素がある。黒い部分が安定しているもの。同位体は、化学的には同じだが、中性子の数が違う。
(編注 : http://ribf.riken.jp/~koji/jishin/zhen_zai.html)

- 原子炉では、ウランやプルトニウムを核分裂させて2つのグループ (真ん中) に変えて、質量欠損をエネルギーに変えている。(編注 : アインシュタインの $E=mc^2$)
 - ウランに中性子を吸収させて核分裂させる。
 - 長崎先生補足 : ウランやプルトニウムが核分裂をすると、平均して2個以上の中性子が発生する。この中性子のうち1個を次の核分裂に利用し (連鎖反応)、残りの1個以上の中性子は核分裂に使われないようにして核分裂を一定速度で起こさせる装置が原子炉。通常運転では、連鎖反応が一定になるように制御されている。現実には、この中性子は即発中性子で核分裂後、ピコ秒のオーダーで発生するので、これを制御するのは不可能だが、核分裂をして生成した核分裂生成物は不安定で大部分はベータ壊変・ガンマ遷移をして安定元素の方に向かう。その壊変のときに中性子 (遅発中性子) を出すものがあり、この遅発中性子を制御している。
 - 原子炉にはいろいろ種類があるが、今回の福島原発はBWR (Boiling Water Reactor、沸騰水型)。GEが開発した。この型は、日本では日立と東芝が作ってきた。
 - Reactor Coreで核分裂が起きて熱が起きる。水をあたためて水蒸気を起こしてタービンを回す。仕事の終わった蒸気は水に戻って原子炉に戻って循環する。ぐるぐる回っている間はいいが、何かの条件で壊れたときにどうするかというのが作るときのポイント。
- Q 日本にある他の原発の型は？
- A 半分がBWR、半分が加圧水型 (PWR: Pressurized Water Reactor) (Westinghouseが考案、日本では三菱重工が作っている)

Q 熱は中性子の運動か？

A 大部分が核分裂生成物の運動エネルギー。重いものが動くときの反跳エネルギー。

スライド 19-20 : BWR-3、Mark1 (沸騰水型)

- BWR-3 Mark1 (沸騰水型) ——70年に始まっている古いタイプ。
- 炉心の下にサプレッションチェンバーという水をためるところがある。何かあったときに熱でいろいろなところが壊れないようにするための場所。
- 燃料プール——炉心の横にある。使った燃料を取り出してためておく場所。水がはってある。熱を除去するとともに放射線を遮蔽する意味がある。今水を入れているのは、放射線の被曝量を下げられるという効果がある。それにより、作業員が長時間作業できるようになる。

Q あたためる水はどこにあるのか。

A 赤い線は水蒸気の流れ。この絵 (BWR) の丸い部分。その中に、炉心があって、たくさんの燃料がはいっている。

Q 炉心の周りにはあるものは何か？

A 燃料集合体というのがある。72本の4mの長い棒がたばになっている。そういうのが500何十体あり、炉心を形成している。

Q プールを高いところにつくるのはなぜか。

A 定期検査の時には上から燃料を出す。そこからクレーンで取り出しておいていく。設計では、この位置にあったほうが落下の事故を防げる、そういう判断。

スライド 21 : 燃料集合体の構造と制御棒

- 燃料集合体——4mくらいの長い棒が72本あって炉心 (燃料棒) を形成する。燃料の交換は日本の場合は1年に1回で4分の1ずつ交換する、定期検査が1年間に3か月くらいある。アメリカの場合は定期検査が短い。古いものは燃える部分が少なくなって発熱に偏りが出るので、シャッフリングをして、炉内が均一になるようにする。中に燃料ペレット (1センチ×1センチ)、黒く焼き固めたウラン酸化物があり、その周りをジルコニウム合金でおおっており、両側にスプリングがある。真ん中には水が流れるところがある。
- 制御棒——十字型。中性子をよく吸うものでできている。
- 炉内の燃料集合体の数 (スライド23) ——3号炉はウランだけではなく、ウランとプルトニウムを混ぜたMOX燃料を使っている。(編注 : プルサーマルと呼ばれている、plutonium thermal use の略、和製英語)

Q 中性子はどのように発生させるのか。

A 一番最初は炉の中に中性子を発生させるもの (中性子源) を入れている。これを火種にし

て核分裂が始まる。(長崎先生)

Q 制御棒があれば大丈夫か？

A 臨界になることはない

Q ウランとプルトニウムが混合されていると危険が高いというのはなぜか。

A 心配されていたのは、炉をシャットダウンして冷やすときに冷え方が遅いという特徴があるためである。

Q 水をいれると放射線が低減するというが。作業員の方は。

A 普通に運転していても、燃料プールの周りは問題ない。普通の管理区域で使用する作業服を着て歩いている。

Q テレビで報道されているような場合、水を入れない場合、中に入っている燃料棒の放射線は炉を突き抜けるのか。

A 出てこない。

Q 燃料はどこが作っているのか。

A 燃料メーカーは3~4社ある。三菱系、東芝系、GEも。集合体あたり数千万円。発電単価ではアメリカでも日本でも原子力が一番安い。

Q 制御棒自体が溶けることはないのか？

A 破損することはある。

- 東京電力は経験上、制御棒を下から突っ込むタイプのBWRが良いと考えている。地震の時に下から突っ込む方が安全だからという理由である。上部の方が大きく揺れてしまうので、下から入れていく方が確実に挿入できる可能性が高いという判断。

Q 使用済み燃料プールは、普通に作業ができるといったが、ほかの場所にくらべたらどのくらいの放射線なのか？

A 特別な服を着ずに近づいて何の問題もない。つい最近スウェーデンに行って使用済み燃料のプールも見てきたが、普通の作業服で近づけた。

Q 水自体は入れ替えるときに普通に捨てて良いのか？

A 通常時であれば、放射性物質は被覆管によって閉じ込められているので、水中にどんどん流出するようなことはない。もちろん、フィルタリング・モニターをしてチェックして環境基準を満たすようなものを捨てている。

Q 水には何が起きているのか。

A 一部放射線分解が起きている可能性はある。安全のためにホウ酸などを混ぜながら循環さ

せているので化学反応が起きているかもしれない。循環してクリーンアップされている。

A ガンマ線は水分子に散乱され、エネルギーを落としていくが、その効果は小さいので、水の厚さを必要とする。中性子は、おはじきを同じ重さのおはじきに衝突させるのと同じで、水素が一番止めるのに効果的であるから水が利用される。(長崎先生)

(編注：ガンマ線とは強いエネルギーを持つ光のこと、X線よりもエネルギーが高い。原子、分子と反応する。大量の水は、水素原子と酸素原子の集合体で、何度もこれらの原子にぶつかる内にエネルギーを落としていく。通常のプール上面に出てくるまでには、人体に危害を与えない光になっている。原子にぶつかったエネルギーは熱となる。ので、冷却機能が失われると、水は沸騰してしまう。余談だが、宇宙からもガンマ線、X線がやってくる。大気の原子、分子にあたって、地上には降りてこない、そのかわり地球の温度を少しあげている)

スライド25：使用済み燃料の中間貯蔵方式

- フィルターで浄化をして回す。貯蔵プール(8m=クレーンでつりあげたときでも作業員が被曝しないように)輸送容器は厚いシールドがある。燃料プールで何年かおいて、発電所内の大きなプールに何年か置いて、別の場所で再処理をして、最終的に廃棄物の形になる。六ヶ所村。

Q 水の温度は？

A 沸騰しないようにというのがポイント。沸騰すると遮蔽効果が落ち、熱交換の効率も落ちる。(編注：ガンマ線(光)は、水分子にあたって、熱エネルギーに変換しているので、沸騰してしまうと、このエネルギー変換がはたらかなくなる)

Q 建物の構造とプールとどういうポジションになっているのか

A プールは原子炉の上のフロアにある。

Q 使用済み燃料のプールの水がなくなるとどうなるか？

A 具体的な数字は分からないが、人間がアクセスできない、人命にかかわるレベルになる。(長崎先生)

Section 5: 福島第一、第二

スライド29：福島第一の見取り図

- 7000集合体くらい入る大きなプールにあるものは既に燃料が冷えている。スペースがないので、発熱が落ちたものを容器に入れて輸送してきて、十分に冷やしておいておく。ここで不都合が起きるようなことは今のところ考えられない。

スライド30：津波による被害

- 想定を大きく上回る津波(10m超)が襲来。地層、古文書等によって福島第一・第二原発

付近で確認されていた最大の津波は3m程度とのこと。第一原発の敷地高さは5mほど。

スライド3 1：重要な機能の喪失

- このところは報道、伝聞情報なので、公式に私が確認したわけではないので、みなさんと情報ソースは同じ。ディーゼル発電機用の燃料タンクがながされたり、この発電機用冷却のための海水ポンプが破壊したり。配電盤も破損したので、そこから電気をもってきて、ここをなおさないと使えない。外部系統が使用不能。

スライド3 2：安全確保に必要な手順

- 原子炉の安全を確保する3つの原則。止める、冷やす、閉じ込める。
- まず核分裂の連鎖反応を止めて、その後残っている熱を取る必要がある。残留熱を全部とって炉全体が冷えるまで水をまわす必要がある。今やろうとしているのは原子炉を冷やす作業。
- 中性子にからんだ連鎖反応を止めることはできた。自動停止。
- しかし、その後の手順ができなくなった。

Q 海水を注入したときにボロン（ホウ酸）も注入したというニュース

A 効果的な中性子吸収材。核分裂をさせないようにボロンを混ぜた海水を注入した。万が一炉が崩壊してバサツとしたに落ちても、周りがボロンを含んだ水なので、中性子を吸収する。

（編注：通常運転の場合、中性子が核分裂を促進させ、連鎖反応のもとになっているので、中性子の発生を止めることが肝要）

Q 一度核分裂が止まった後に、再び核分裂は起こらないか？

A 炉心に挿入された制御棒があること、大量のホウ酸を含んだ水で満たされていることから、再び核分裂を起こす状態になることは考えにくい。自然崩壊は起こっている。

（編注：自然界では、ウランは自然に崩壊して、熱を放出している。半減期、ウランの量が半分になる時間は、数億年から数十億年の単位である。地球創成46億年の後、地球の核、マントルが熱いのはこの崩壊熱によるもので、この熱によるマントルの対流が地震の原因となっている。原子炉では中性子線を使って分裂を促しているが、この反応はすでに止まっている）

Q 自分の炉で発電した電気で、自分のシステムを動かして冷却をするということにはなっていないのか。

A なっていない。

Q 発電しているものをつかえばディーゼルのバックアップはいらないのでは。

A いろいろリスクを勘案すると、それは危ないと考える。全部止めて、緊急停止のシステム

が動くほうが、安全という考え。

A 原子力発電所の電気は、変電所を通さなくては使えない。(村上さん)

A 通常時は結果的に使っている。出しているものの10%は自分たちで使っている計算になると思う。点検の時は、とめるので外部電源を使っている。(長崎先生)

Q 外部電源が切れると、炉を止めたのは本当によかったのか。炉は自動的に止めるのか。それとも人為的に止めるのか。

A 当直長や所長が止めることはできる。地震である加速度を超えると、自動的にとまるようになっていて。安全最優先で原子炉を止める。(長崎先生)

スライド34 : The 2 Big Problems

- 原子炉の冷却機能の喪失
- 使用済み核燃料プールの冷却機能の喪失

スライド35 : 原子炉の冷却

- 中の水が蒸発していくと燃料棒がむき出しになって水蒸気と接触する。ジルコニウム合金が水と反応して水素が発生する。水素爆発。

Q 被覆管にジルコニウムを使う理由は？危険性はないのか。

A 昔から議論がある。きちんと水に浸かっている限りは耐食性、加工性がいい、中性子を吸わないという利点がある。一方、中の水が蒸発して燃料棒がむき出しになると、ジルコニウムが水蒸気と反応して、ジルコニウム酸化物となる。ジルコニウム酸化物は体積が増えて弱くなるので、被覆管の役割を果たせなくなり、中にあった燃料のペレットがむき出しになる。ペレットが出てくるとヨウ素、セシウム漏れの可能性がでてくる。酸化は外側だけではなくて内側からも起きるということをスリーマイル事故後の観察から言う専門家もいる。

スライド37 : 発熱量の推定

- 炉内の数字。どの位の熱があるのか？リアクターを止めた後、8日目で7メガワットくらいの熱(崩壊熱だけ)。
- 1秒に3リットルの水を循環させる必要。消防ポンプで水をまわすのも効果的だという根拠の一つになっている。(最悪を考えた場合の数字)

Q 炉心の外側に放水しているのでは？

A 炉心の中に海水を入れている。塩がたまるのではないかとということも心配されている。十何トンくらいたまる可能性。悪影響はないと思うが、水の流れをブロックしてしまうおそれがある。せっかくホウ酸を入れたが行き渡らない等不測の事態が発生する可能性がある

る。なるべく早く海水から真水に戻す必要があると、アメリカの専門家も提案をしている。

A (長崎先生より補足：電気事業連合会によると、今回のような事態でも燃料を水に浸し、原子炉の安全性を確保するため、1) 発電所構内の、ろ過水タンクから消火系配管を通じて圧力容器内に注水。2) 消防車のポンプ車を消火系配管に接続し、圧力容器内に注水、等の方法は過去に研究・検証されている。今回の事故時には、水源は、ろ過水や防火用水を使い、なくなった後は海水を使用。安全性を高めるために中性子を吸収する性質を持つホウ酸も同時に注入。とあるので、圧力容器内に海水を注入していると思われる)

Q 8日目に7MWということであったが、通常はどのくらいか。Fissionの時と、核分裂の時、制御棒を入れた後との比は。

A 大まかにいって、1週間で、定格出力の0.3%になる。(編注：定格出力、設計上安定して、連続して使用できる出力)

Q 建屋が水素爆発したのはなぜか。

A (長崎先生補足) 現時点ではなぜ建屋内に水素が蓄積したのかは不明である。

A 中に圧がたまってきたので、そこから、という考えもある。

A 格納容器から放出された蒸気は圧力抑制室 (suppression pool) で水の中を通ってくるので、水素と希ガスがほとんどと考えられている。大部分の放射性物質は水に残る。希ガスは他の物質と(生体とも)反応しないので影響は少ないと考えられる。(村上さん)

スライド38：使用済み燃料の冷却

使用済み燃料プールを水で満たし、冷却・遮蔽することが難しくなった。

スライド39：原子炉の現状と今後

今のところ安定している。緊急冷却装置(ECCS)が壊れておらず、電気があって生き返るのであれば、どんどん冷えていって一週間以内の間に冷温停止できる。

Q ECCSの説明をしてもらいたい。

A ECCSは炉心が何かの状況で急に熱くなって、冷却する水がなくなって炉心がむきだしになったときに、大量の水を炉心に供給するシステムが最低2つ備わっている。水の減り方の速さによって2つ。ディーゼル電源があることが前提の1つであり、これがないのが今の問題。

Q ECCSは一回数時間動かせばいいのか

A この場合は、水を大量に入れるという速さが最初のポイント。あとのバックアップの水を

動かすシステムに任せることになる。

Q ECCSを動かさなかった理由は？水を大量に入れるための電気は、蓄電池ではダメなのか？

A 蓄電池は直流。8時間くらいもつように設計されているので、どこかで使ったとは思いますが。(編注：ECCSを動かすには交流電源が必要)

Q ECCSを動かせるバッテリーの量はあったのか。

A わからない。

Q 原子炉は密閉されているのになぜ水が減るのか？

A 想像だが、タービンは止めてしまっただけで循環しているが、蒸気で圧力が上がると、圧力容器内の圧力が上がりすぎて破損するのを防ぐために、自動的にベントされる。このときに圧力容器内から格納容器内へ水蒸気を出さざるを得ない。(編注：ベント、記者会見で多用され、個人的にずっと謎だった言葉、英語で vent ヴェント、air vent、空気抜きとかに使われる言葉。bent のことだと思っていたので管を曲げることかと誤解していましたが、違います)

Q ECCSを動かしても廃炉にする必要はない？

A 必ずしもそれだけでは廃炉にならない。

Q 最近の原子炉の仕組みは違うと聞いたが。

A ナチュラルサーキュレーションで除熱できるようにという設計思想に変わってきている。アドバンスドBWR (ABWR)、シンプルファイドBWR (SBWR) とかは、ここで見ている事故は起きないと思われる。

Q 廃炉にしなくてはならない理由は？

A 燃料が一部溶融して塊になっている可能性がある。いろいろ調べないとわからないが、格納容器、圧力容器の健全性が保たれていない可能性がある。最低3つ原子炉がダメになる。

もう一度検証して保証して動かすということにはならないだろう。

スライド 4 1、4 2：使用済み燃料プールの現状と見通し

- 楽観的に考えている。水の供給、外部電源もつなごうとしている。サーモグラフィーを使った観測でも温度がおさえられていると考えられる。周辺は、セシウムとヨウ素でしか汚染されていないと思われる。ウランやプルトニウムのような、燃料に含まれている固体の放射性物質が炉内から出てきたという事象は観測されておらず、炉内にあるという観測である。不測の事態もあるかもしれないが。

スライド43：福島第二、安定状態を回復

- 福島第二は、安定状態を回復している。各号機とも冷温停止に成功しているので、ここはもう安心。

Section 7：過去の事象との比較

スライド45：大気圏内での放射性物質降下量

- 東北大学の北村先生の分析はぜひ見ていただきたい。<http://getnews.jp/archives/105218>
- 過去にはかなり高レベルの放射線を被曝していた歴史がある。50から60年代の大気圏内核実験のときにはかなり高かった。子供のころ(1960年代)雨のときに傘を差さないで頭がはげるといった話があったが、こういう状況が前提にある。チェルノブイリのときにも一時的に増加した。今回の放射線量上昇は、過去日本人が生活してきたレベルの範疇に入っている。

Q これはどここのデータか？

A (編注：調べたところ、日本各地の雨水、塵に含まれる降下量)世界的に観測されている

スライド46、47：チェルノブイリ事故

- チェルノブイリは、臨界反応が進行中の事故だった。炉心を作っていた黒鉛が燃えて火事になり、高空にいろいろなものが吹き飛ばされて世界中に広まった。それだけエネルギーが大きかった。チェルノブイリはかなりひどい事故だった。今回の福島の水素爆発は、格納容器の中のものに爆発で吹き飛んだわけではない。ケミカルな爆発なので、質的にはかなり違う。

スライド48：IAEA Nuclear Radiological Events

- IAEAの事故ランキング——チェルノブイリがレベル7、スリーマイルがレベル5、東海村のJCOがレベル4。今回は、スリーマイルと比較できるレベル。

スライド49、50：元素周期表、放射性核種

- 今回は、セシウム、ヨウ素が大気中に漏れ出して問題となっている。ウラン・プルトニウムが出てきているという情報は今のところない。ストロンチウムはチェルノブイリで放出されたが、これも半減期が長い。
- ヨウ素は半減期が8日。チェルノブイリの時は、フォールアウト(放射性降下物)の放射能を感知したのは一週間後であった。今回は既にこちらでもいくつか見つかったとのことである。8日毎に半分ずつになるので、時間を稼げば稼ぐほど問題はなくなっていく。セシウムとストロンチウムはしばらく環境中で観測される。

- チェルノブイリのときは、30年間そこにいると1ミリシーベルトというセシウムが出た。ストロンチウムは土壌残存性が高い。体内の造血組織に蓄積されやすい。ウランの分裂によって出てくるもの。揮発性が低く、今回は観測されていない。

スライド5 1：放射線、放射能の単位

- 「グレイ」はエネルギー量を示す単位であり、「シーベルト」は人間の身体に及ぼす影響を示す単位だが、ガンマ線を発する核分裂生成物（セシウムやヨウ素）は大雑把にいうとグレイ=シーベルトとっていい。

スライド5 2、5 3、5 4：日常の被曝の程度

- 体内のカリウム40：体内から出ている。空気中のラドン：アメリカにおける放射線の影響の半分はこれといわれており、窓を開けて換気するようにといわれている。飛行機搭乗：フライトアテンダントが労災を主張して裁判になったりしている。
- デンバーに引っ越すと、ベイエリアに比べて1ミリシーベルト増加する。花崗岩の地帯なので。インドはさらに高い。トリウムがあるから。
- 世界の平均値は、1人あたり自然放射線量が2.4ミリシーベルト（1年間）、ブラジルは10ミリシーベルト。100ミリシーベルト以下では、健康症状が確認されていない。今の原発の作業員も法律上の上限を遵守しながら交替でやっている。

スライド5 5：福島第一原発モニタリングデータ：

- 大きな数字が継続しているわけではない。全体で考えると広がって薄まるので、ピークの数字を見てもあまり意味がない。放射線は、距離と時間でどんどん下がるという性質がある。

スライド5 6：各地の放射線レベル

- 文部科学省原子力安全課原子力環境防災ネットワークのHPで各地の放射線量レベルが分かる。<http://www.bousai.ne.jp/tex/index.php> 例えば、東海村は福島原発に結構近いが、1.6から3.9ミリシーベルト / 年相当であり、公衆への影響は今のところないと考えてよい。仮に今の状態が1年間川崎で続いたとき = 胃のレントゲン写真を1回取ったくらいの放射線量レベルと考えるとよい。
- ただし、30キロ圏境界付近の1つの地点で、毎時150マイクロシーベルトという高い数字もある。同心円状ではなく、不均質に広がっているので高くなる場所もある。（村上さん）
- 気象データによって数字は変わってくる。直接こういうデータを見ながら判断することが重要である。

スライド57：緊急時

- 緊急時の管理システムはあったが、複雑。これを見たときの率直な感想は、複雑で、こんな動いているのかなというもの。根拠は何十もあって、それによって今動いているものと思われるが、緊急時対応のはずなのに非常に複雑なものになっている。

以上講義、以下参加者からの質問

Q1 いろいろ原発に関する情報が流れていたが、プロの目から見るとどうなのか。

A 自己批判も含めて専門家は安全だと言っていた。過去に例を見ない津波だというエクスキューズもあるが、今回のポイントはCommon Mode Failure、つまり、津波という一つの原因で全部だめになったということ。電源が動かなくなり、海水冷却が動かなくなった。また、なぜ同じところにこんなに複数建てたのかという反省もある。(編注：Common Mode Failures (CMF) are multiple unit failures due to a single cause (W.C. Gangloff)：単一の要因によって、冗長機器が同じモードで同時に故障すること)

Q2 非常用電源が動かなくなったということだが、ディーゼル発電機はどの辺にあったのか。

A 発電機の位置は覚えていないが、重油のタンクは海側にあったはず。(長崎先生)

Q3 他の原発の非常用電源はどうなっているのか。

A すべての非常用電源はディーゼル発電機を使っている。建物の中にあり、津波の影響は考えている。想定内の津波であれば影響を受けないように作られている。

Q4 冷やすことについて、人ではなくロボットがやるようなバックアッププランは無かったのか。人がやらなくてはならない理由は？

A 原子力の分野でロボットを使うというアイデアはあったが、こういう状況を想定して開発していたかどうかは分からない。爆発後はいろいろなものが飛び散ったりして、そういう環境でやれるか、という問題はあるが、今後考えるべきことである。

Q5 このまま冷却が進む最善のシナリオはわかったが、今考えられる最悪のシナリオは？

A 今考えられる最悪のシナリオは、外部電源を持ってきてもECCSが動かない、放水等で冷やすしかないというシナリオである。今の状態が続くということの意味する。仮に電源が機能しなかった場合、1週間が1つのボーダーで、1か月を超えることはたぶんない。期間が長くなれば、時間を稼いで1か月の間に他の手段を講じることができる。

Q6 核反応が再度起きるといふシナリオは。

A 少なくともスリーマイルでは起きなかった。現時点では起きないと考えている。

Q7 最悪の場合のシナリオのケース、電気系統が起動しなかったら。今の作業は何日くらいかかるのか。

A 除熱のレート、まわっている水の容量にもよるが一週間のオーダーだろう。(編注：講演日3月19日)一か月をこえることはない。

Q8 原子炉内に電気のない状態で、どのように水を入れているのか。

A 消防ポンプで入れている。作業員が近くまで行ったものと思われる。

Q9 危険性の評価等について、日本と外国の認識の違いがあるか？

A 日本政府は住民の生活を考えている。短期滞在の外国人はすぐに避難できるが、生活している人を根こそぎ動かせるかという問題がある。炉内の放射性物質が全部出てしまうという一番悲観的な前提に立つと、30から50kmで線量があくつと下がるので、これが米国政府が出した80km(50マイル)という数字の根拠になっているものと思われる。しかし、そのようなこと(炉内の放射性物質が全部出てしまうという一番悲観的な前提)は現時点では考えられない。米国の中でもとてつもなく可能性の低いシナリオで数字を出した、日本政府を窮地に追い込んだという批判が出ており、関係者の間では評判が悪い。30kmというのは妥当な数字だと思う。

補足コメント：米国原子力規制委員会は80km圏以上の避難勧告をだし、これが米国政府の公式見解となったが、これに対し、米国原子力委員会は、80km圏は大きすぎると反論した。英国科学院も日本政府の20km圏避難勧告は妥当であるとし、仮に1から6号機すべて現在より状況が悪化しても、避難勧告距離はかわらないとししている。(安谷屋さん)

A セシウムとヨウ素が見ついている。他はみつっていない。そうすると事故の様相としてはチェルノブイリではない。あとはその二つがどこまで動くか、という話。

Q10 なぜ今ストロンチウムが見つからないのか？

A セシウムは揮発性が高い。

A セシウムは核分裂生成物の中で揮発しやすい元素だから。(長崎先生)

A 補足：ストロンチウムは沸点が高く気化しにくい、よって拡散しにくい、(安谷屋さん)

Q11 放射性物質が同心円状ではなく、広がり方に凹凸があるという話だったが、風に乗って

動くのか、土壌にたまるのか。ほうれん草から出たという話だが、今後どうなるのか？

- A 大事なポイント、これから解析しないといけない。少なくとも今見つかっているレベルは深刻なレベルではない。ただ、注意しないといけないのは、今議論しているのは外部被曝であり、食べ物を食べたときの内部被曝というのは別途検討する必要がある。一部フードチェーンにのっているということは注目しなければならない。

Q12 ヨウ素、セシウム、ストロンチウムの人体に与える影響の違いは？

- A 体内に蓄積する部位が違う。例えばヨウ素は甲状腺に蓄積するので、高濃度で被曝すると甲状腺がんの原因になる。(編注：ストロンチウムは造血組織に蓄積しやすい、講義より)

Q13 福島原発が廃炉になってしまうことの、電力供給への影響は？

- A 福島第一のみならず、東北地方の原発は今後しばらく動かせない。社会的にも技術的にも。日本国内の発電量のうち原発の割合は30%であり、これが20以下に減ることになる。3000万キロワット程度に相当するかなりの減少が生じる。

Q14 福島は東京電力？東北にいかないのか？

- A 困ったときに、融通するシステムはあるが、福島県は東北電力の営業区域なので、福島原発から直接東北地方に電力が供給されているわけではない。

Q15 英語でメルトダウンといった場合、どのような意味なのか。

- A 人によってどのような意味で使っているかが違う。深刻な意味で使っている人は、コアが鋼鉄の容器を溶かして、落ちるという意味で使っている。今の福島1、2、3号基は、メルトはしているが、ダウンはしていない。

Q16 潜水艦の原子炉でも同じことが起こりうるのか？

- A Common Mode Failureという点では、気を付けないといけない。原子力潜水艦にはアメリカ型とロシア型がある。ロシアの鉛ビスマス型は熱事故には優れているという話を聞いている。(編注：鉛ビスマス合金は冷却材として使われ、原子炉は安全性、耐久性に優れている)

Q17 海水を入れ廃炉にする決断を鈍ったという、初動の判断にミスがあったのではないかというニュースがあったが。

- A 東京電力として廃炉は避けたかったというのは当然。まだいろんな設備が動いているという期待があったため、いろいろなことを試そうという判断があったのだろう。それが遅れ

につながったという評価もありうる。これから解明すべき問題である。

Q18 このような場合の対応についてガイドラインはあるのか。

A 二系統の冷却機能喪失は異常事態。東電の社長クラスで、設備投資 2 兆円を廃炉にする判断は難しいだろう。

A 技術上のガイドラインはないと思う。最初は外部電源が復活するかもしれないという期待があった。外部電源が使えれば、ECCSを使うことができ、そうすれば今やっているような外部の仮設ポンプよりもずっと確実に、ずっと大量の水を注入できる。海水を入れるといっても、最初は海水を入れる方法がなかったので、そうした中での判断だと思われる。
(長崎先生)

Q19 4号機は昨年末以来停止していたという話だが、プールが干上がったら問題があるのか？

A 4号機は、プールに入っている燃料の年齢が違う。とにかく水を入れることが重要である。水は放水で入る状態なのではないかと思われる。

Q20 生活レベルの話について、水や農作物への影響はどうか。何に気をつけるべきなのか？

A 現時点の農作物は、放射性物質を内部に取り込んでいるわけではなく、表面に付着しているだけなので、洗うのが一番。これでだいぶ違う。外から帰ってきたら、服をぬいで身体を洗う。

A 食物によって放射線の取り込みやすさが違う。放射線を取り込みやすい代表的な食品としては、ミルク、きのこがある。(チェルノブイリを研究してきた方から聞いた)野菜等の上に積もったものと、いったん取り込まれたものは違う。ミルクは牛が食べて、それがミルクを汚染する。今の段階で、はっきりしたことはわからないが、特に子供は検査体制が整うまでは注意すべき。(村上さん)

A 外からの被曝は問題ない。内部に取り込まれることに関しては検討する必要があるが、今のところはまだ食べ物まで到達していない。したがって、現在のところは、圏外の人には普通に暮らしてよい。

Q21 トマトは何分くらい洗えばよいか？

A 普通に洗えばよい。

Q22 胎児への影響は？

A 外から来る放射線の影響は無視できるものだろう。食べてなにが起きるか、というのは、食べるものからの放射能はそこまで到達してるか、それはまだ心配ない。圏外にいる人は

普通に暮らせる。

Q23 最悪シナリオを今一度聞きたい。今後、放射線量の増加により、作業員が近くに寄れなくなる状況はあるのか？

A 現時点では考えにくい。仮にあったとしても、ヘリコプターを使う等、水の供給に関してはまだ手段が残っている。

Q24 地震が多発する中、浜岡を含め、他の原発を止めるべきか。

A 非常に難しい判断だが、病院が停電になるなど、止めることによる社会的なリスクの方が大きいのではないかと。

Q25 長期的なエネルギー政策についてどう考えるか。

A 個人的には、原子力関係の人は今は先走った発言をひかえるべきだと思う。国民が最悪の状況を見ている状態である。国民自身も問われている。原子力をなくすのも道、リスクを取って原子力を進めるのも道、真摯な議論が必要であろう。今後このリスクを含めて議論・判断して、もう一度原子力をやりたいとなったときに、原子力関係者として何かできるかもしれないが、今は何とも言えない。

Q26 女川は震源に近かったのに動いたのは何が違うのか。

A 14mの高台にあって、津波の影響がなかったものと思われる。町は非常に被害を受けたが、原発は設計通りに自動停止し、問題が発生しなかった。

Q27 阪神大震災の教訓は学ばなかったのか？津波を想定したもの、直下型を想定したものなど、各リスクファクターを考えると、設計思想は違うものになっていたと思う。地震国において原発の設計思想をいかに考えるべきなのか。

A アメリカと日本の比較は軽々にはできないが、アメリカの原子力の安全規制は、Risk Informed Performance Based Regulationの思想で行われているといわれている。リスクをあるレベル（社会的に容認されるレベルに設定しておき、その範囲の中でオペレーター（運転員という意味ではなく電力会社など運転にかかわっている組織という意味）がいろいろ判断し創意工夫できるという考え方。これに対して、日本の場合は、この部分がこうあらねばならない、という基準であり、狭い部分の安全は考えられるが、その規制の中に今回のような観点があつたかということ、なかったと言わざるを得ない。柏崎や東海村の臨界事故の時に、日本の規制も少しずつ変えている。今回のことは、言い訳じみて聞こえるが、それをはるかにこえたところで、Common Mode Failureが起きていると考える。いろいろなファクターで不完全だった。そこをどう変えていくかが今後の課題である。

Q28 今後の設計思想は？

A 設計思想を決める社会的な枠組みが必要だと思う。例えば、私の口からは言いにくいですが、今回同じ場所に複数基集中したのはなぜか。社会的にそこに集中せざるを得ないのであれば、それに応じた設計思想を考えるべきである。

Q29 GEのエンジニアが抗議の辞表を出したというニュースがあったがどういうことか？

A その話は把握していない。(編注：3月15日付のABCニュースは、マークIの設計に加わった、Dale G. Bridenbaughと2人のエンジニアが、設計に欠陥があると35年前に抗議の辞任をしていたと伝えている)

Q30 福島をどのように安定した状態にするのか。チェルノブイリのように石棺にするのか。周辺の人たちはいつ頃地元に戻れるのか。

A 水の冷却が進んで、原子炉が安定している状態であれば、石棺に詰めるという状態にはならないのではないかと。スリーマイルのように冷えるのを待って、中を調査する。スリーマイルの後処理は今でもやっている。50年単位の話である。ただ、周辺住民が地元に戻れるまでにはそれほど長くかからず、仮に長くても何か月という単位である。ただ、土壌の問題、農業に使えるかという話は別途あり、調査が必要である。

Q31 漁業への影響は。

A 沿岸部には海流があるので、そこにとどまっているものは多くない。漁業への影響は限定されていると思われる。

Q32 メルトダウンするかもしれないといわれている原子炉の下に、報道されていない受け皿のようなものがあると聞いたが？

A 最悪のシナリオとしては、溶けた炉心が圧力容器と格納容器を突き破るとコンクリートと反応して蒸気/水素爆発を起こす恐れがある。今は圧力容器と格納容器が健全なので、冷やしている限りは大丈夫。

補足：炉心が溶けて落ちるのを防ぐのに必要な水量はそんなに多くない。毎分200リットルが必要とされているが、毎分6000リットル以上放水できる消防車の水量があれば十分である。(村上さん)

A これまでの情報をもとに今の状況を見る限りではいわゆるメルトダウン(コンクリートを巻き込んで反応して爆発する)は原理的に起こりえないと思う。

Q33 そういった情報が伝わっていない。チャイナシンドロームなどという映画もあり、一般人は心配している。

A これまでの冷却の結果、熱が下がっており、メルトダウンを起こすようなエネルギーは炉内にもう残っていない。メルトダウンによる爆発の可能性はないといってよいと思う。

Q34 電気がないのに、水量・温度はどのように報告しているのか。

A 中央制御室まで誰かが定期的に行って、懐中電灯で照らしながら読んでいるのではないが。

A 中央制御室まではデータが来ているかもしれない。(長崎先生)

Q35 電気がなくても問題のないバックアップを含めて設計しなかったのはなぜか。設計当時の記録等は残っているのか。

A 今後記録は出てくると思う。

A 電気がなくても、蒸気を使って動かすポンプはある。今回もそれは作動しほしよした。その間に外部電源を復旧させるという設計だったと思うが、電源がなかなかつながらなかった。(長崎先生)

Q36 情報発信のサイトなどを作らないのか。

A 既にいろいろあるが。

Q ありすぎて困る。

A そうですね。考えたい。

以上講義終了、雨の降る中、80名強の参加者があった。当初は2時間の予定であったが、熱のある講義と参加者からの積極的な質問の数々により、3時間の講義となった。講義の後、参加者24名、ダウンタウンパークレーで夕食を共にする。議論は安教授、長崎教授を交え、午後10時まで続いた。

監修：安俊弘教授 (UC Berkeley)、長崎晋也教授 (東京大学)

講義録収録：大野志保、太田禎夫 (UC Berkeley)、寿楽悦子

校正、校閲：村上治子、万仲豊、安谷屋秀仁、石原明子、菅原貴子

編集：鈴木なお (Lawrence Berkeley National Lab)

発起人：校條 浩 (東大桑港赤門会)

会場設営：松島博英、谷口博基 (UC Berkeley)

協力：JGRB (Japanese Graduates & Researchers Society at Berkley)、東大桑港赤門会

お問い合わせ：Nao Suzuki (nao.suzuki@gmail.com)