ABCC・放影研の歴史的役割

―放射能安全神話と原発など核施設―

その⑥　ついに核産業界からも提出されたLSS研究に関する疑義－INWORKSの固形がん死の研究

２０１７年１１月９日

報告者：哲野イサク

電離放射線の職業的被曝によるがんのリスク：フランス、イギリス及びアメリカにおける後ろ向きコホート研究(INWORK)（Risk of Cancer from occupational exposure to ionizing radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom and the United States）【ブリティッシュ・メディカル・ジャーナル　2015年10月20日】と題する研究の結果をここでまとめておき、この研究が、「フクシマ放射能危機」に対応する日本社会に提出する重要な問題を先にここで見ておこう。

RESEARCH

OPEN ACCESS

Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS)

David B Richardson,[1] Elisabeth Cardis,[2,3,4] Robert D Daniels,[5] Michael Gillies,[6] Jacqueline A O'Hagan,[6] Ghassan B Hamra,[7] Richard Haylock,[6] Dominique Laurier,[8] Klervi Leuraud,[8] Monika Moissonnier,[9] Mary K Schubauer-Berigan,[5] Isabelle Thierry-Chef,[9] Ausrele Kesminiene[9]

[1]Department of Epidemiology, School of Public Health, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599, USA
[2]Center for Research in Environmental Epidemiology, Barcelona, Spain
[3]Universitat Pompeu Fabra, Barcelona, Spain
[4]CIBER Epidemiología y Salud Pública, Madrid, Spain
[5]National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, OH, USA
[6]Public Health England Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards, Chilton, UK
[7]Department of Environmental and Occupational Health, Drexel University School of Public Health, Philadelphia, PA, USA
[8]Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses, France
[9]International Agency for Research on Cancer, Lyon, France

Correspondence to: D B Richardson
david.richardson@unc.edu

Additional material is published online only. To view please visit the journal online (http://dx.doi.org/10.1136/bmj.h5359)

Cite this as: BMJ 2015;351:h5359
doi: 10.1136/bmj.h5359

Accepted: 9 September 2015

ABSTRACT

STUDY QUESTION
Is protracted exposure to low doses of ionising radiation associated with an increased risk of solid cancer?

METHODS
In this cohort study, 308 297 workers in the nuclear industry from France, the United Kingdom, and the United States with detailed monitoring data for external exposure to ionising radiation were linked to death registries. Excess relative rate per Gy of radiation dose for mortality from cancer was estimated. Follow-up encompassed 8.2 million person years. Of 66 632 known deaths by the end of follow-up, 17 957 were due to solid cancers.

STUDY ANSWER AND LIMITATIONS
Results suggest a linear increase in the rate of cancer with increasing radiation exposure. The average cumulative colon dose estimated among exposed workers was 20.9 mGy (median 4.1 mGy). The estimated rate of mortality from all cancers excluding leukaemia increased with cumulative dose by 48% per Gy (90% confidence interval 20% to 79%), lagged by 10 years. Similar associations were seen for mortality from all solid cancers (47% (18% to 79%)), and within each country. The estimated association over the dose range of 0-100 mGy was similar in magnitude to that obtained over the entire dose range but less precise. Smoking and occupational asbestos exposure are potential confounders; however, exclusion of deaths from lung cancer and pleural cancer did not affect the estimated association. Despite substantial efforts to characterise the performance of the radiation dosimeters used, the possibility of measurement error remains.

WHAT THIS STUDY ADDS
The study provides a direct estimate of the association between protracted low dose exposure to ionising radiation and solid cancer mortality. Although high dose rate exposures are thought to be more dangerous than low dose rate exposures, the risk per unit of radiation dose for cancer among radiation workers was similar to estimates derived from studies of Japanese atomic bomb survivors. Quantifying the cancer risks associated with protracted radiation exposures can help strengthen the foundation for radiation protection standards.

FUNDING, COMPETING INTERESTS, DATA SHARING
Support from the US Centers for Disease Control and Prevention; Ministry of Health, Labour and Welfare of Japan; Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire; AREVA; Electricité de France; US National Institute for Occupational Safety and Health; US Department of Energy; and Public Health England. Data are maintained and kept at the International Agency for Research on Cancer.

WHAT IS ALREADY KNOWN ON THIS TOPIC
Ionising radiation is an established cause of cancer
The primary quantitative basis for radiation protection standards comes from studies of people exposed to acute, high doses of ionising radiation

WHAT THIS STUDY ADDS
In a study of workers exposed to radiation at low dose rates typically encountered in nuclear industries in France, the United Kingdom, and the United States, the results suggest a linear increase in the relative rate of cancer with increasing exposure to radiation
Contrary to the belief that high dose rate exposures are substantially more dangerous than low dose rate exposures, the risk per unit of radiation dose for cancer among radiation workers was similar to estimates derived from studies of Japanese atomic bomb survivors
Cancer risks that are associated with protracted radiation exposures can help strengthen the foundation for radiation protection standards

Introduction
In 1943, a large scale programme to develop nuclear weapons, and later nuclear power, began in the United States.[1] Soon afterwards, nuclear programmes also began in the United Kingdom and France. These programmes have employed hundreds of thousands of workers over the past 70 years. In the 1990s, an international study of cancer risk among radiation workers in three countries was carried out using a common core protocol, and this study subsequently was expanded to include 15 countries.[2 3] Cohorts of workers from France, the UK, and the USA provided the vast majority of the information available on early nuclear workers included in that study,[3] and each of these cohorts has been updated recently.[4-6]

The updated cohorts of nuclear workers from France, the UK, and the USA have been pooled, and an epidemiological analysis of cancer mortality conducted, as part of the International Nuclear Workers Study (INWORKS). These cohorts are among the largest, oldest, and most informative groups of nuclear workers in the world. They include men and women who have been monitored for external exposure to radiation using personal dosimeters and have been followed up over decades to

the bmj | BMJ 2015;351:h5359 | doi: 10.1136/bmj.h5359　1

一言でいえば、ABCC・放影研と連綿と続くLSS研究の成果に事実上全面的にそのリスクモデルを依存しているICRPの勧告とその宣伝にいつまで依存しているのかという問題である。

それはこの研究の重要な問題意識のひとつでもある。論文の「討論」と題される項目に次のように記述している。

「現代的な放射線防護基準を確立している放射線リスク推定の主要な根拠は、日本の原爆被爆生存者の「寿命調査」（the Life Span Study）におけるがんに関する分析に由来している。」

「･･･原爆のような高線量率の被曝は、公衆や核産業労働者が遭遇する低線

量率の被曝よりもさらに危険であるという推定からなされた勧告だった。そのような低線量被曝の影響に関する疑問は、一定程度７０年代以降、核産業労働者の研究を動機づけてきた。」

ここで INWORKS が述べていることは明白であろう。LSS に基づく電離放射線のリスクモデルに対する疑問は、７０年代の早くから出されており、このリスクモデルによる放射線防護策で核産業界の労働者の健康と生命ははたして護れるのかという問題提起である。核産業労働者の健康と生命が守れないなら、公衆の健康と生命が護れないのは当然のことだ･･･。

核産業労働者コホートは３０万人以上

この研究は後述するとおり、1944 年以来の、マンハッタン計画で操業を開始したワシントン州ハンフォード工場（兵器級プルトニウムを製造）やテネシー州クリントン工場（兵器級ウランを製造）以降、フランス、イギリス、アメリカの核産業で働いた労働者 30 万 8297 人をコホート（研究対象者）として、2005 年まで追跡調査をした、その結果追跡調査終了時点で、6 万 6632 人が死亡しており（全体の 22%）、うち 1 万 9748 人があらゆる種類の「がん」で死亡したことが確認された（うち、白血病死が 684 人：肺がん死が 5802 人）とするもの。

核産業労働者の従事年数はその中央値が 12 年であり、一人の追跡年数の中央値は 26 年だった。外部被曝のみによる放射線吸収線量は平均 20.9mSv だったが、その中央値は 4.1mGy と驚くほど低かった。（この研究では、結腸=Colon の吸収線量をマーカーに使っている）つまり核産業労働者の被曝線量はほとんどが低線量被曝（被曝線量 100mGy 以下の領域を“低線量被曝”と一般には呼んでいる）だったのである。

核産業労働者は、長期間（中央値 12 年）にわたる低線量の外部被曝を受けていた。その結果、がんによる過剰な相対死亡率は 0.48 と有意に高かった。

例え低線量といえども、またたとえ外部被曝のみといえども、長期間にわたる電離放射線被曝は有意にがん死をもたらすのである。この研究の結果は、「フクシマ放射能危機」に直面する私たち日本社会に深刻で冷厳な“事実”を私たちに突きつけている。

一方で日本政府は、ICRP の「100mSv（積算実効線量）以下の低線量被曝は健康に害があるとする科学的証拠はない」とする学説を無批判・無条件に採用して、フクシマ放射能危機に対応している。危険きわまりないというべきであろう。

被曝線量の明確な核労働者研究

それではこの研究の内容をみていこう。（色字カッコ内は理解のための但し書き）

【概要】（Abstract）

研究：問題（question）は、電離放射線への低線量被曝と固形がんの増加には関連があるのかどうか？

方法：このコホート研究では、フランス、イギリス、アメリカの核産業労働者であって電離放射線への外部被曝に関する詳細なモニタリング・データを保持している30万8297人と死亡登録を関連づけた。1Gyあたりの放射線被曝によるがん過剰相対死亡率を推定した。追跡研究は、820万人年に及んだ。追跡研究終了時点で6万6632人の死亡が知られており、うち1万7957人が固形がん死による。

研究の答えと限界：

結果は被曝線量増加とがん死は直線的に増加することを示唆するものだった。（低線量外部被曝であってもがん死と被曝線量は比例して増加した）被曝した労働者の平均結腸（colon）積算被曝線量は20.9mGyであり、中央値（median）は4.1mGyだった。

追跡調査の規模は8.2百万人年であり、一人あたりの追跡調査年数の中央値（median）は、26年。また核産業労働者の勤務年数の中央値は12年であり、追跡調査完了時点での到達年齢（attained age）の中央値は58歳。ほとんどのコホートは男性であり（26万8262人、全体の87%）、被曝のマーカーに選択した結腸の総集団被曝線量の97%までが男性によるもの。

入手データの検討の結果、コホートのうち25万7166人は、確実に信頼のおける被曝記録をもっており、この記録から結腸の積算被曝線量の推定値が得られた。その推定値は相当に幅があった。平均値は20.9mGy で、中央値は4.1mGyに過ぎない。圧倒的多数の積算被曝線量が10mGy 以下だった。

因みに90位パーセンタイルは53.4mGyであり、最大積算被曝線量と推定された人は1331.7Gyだった。結腸の総集団被曝線量は5370.3人Gy。

表「がんの種類による過剰相対死亡率」をみてみると、すべてのがん死1万9748人の相対過剰死亡率は0.51、全がん死から白血病死を除いてみると0.48、固形がん死のみだと0.47、固形がん死から肺がん死を除いてみると0.46と、いずれも大きな値がでている。

Table 2　**がんの種類による過剰相対死亡率の推定値**

死亡原因	死亡数（人）	1 Gy あたりの過剰相対死亡率（90% 信頼区間）
全がん死	19,748	0.51（0.23 から 0.82）
白血病死を除く全がん死	19,064	0.48（0.20 から 0.79）
固形がん死	17,957	0.47（0.18 から 0.79）
肺がん死を除く固形がん死	12,155	0.46（0.11 から 0.85）

※推定値は 10 年間ラグの推定

【参照資料】ブリティッシュメディカルジャーナル（BMJ）「Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation:retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS)」Table2
http://www.bmj.com/content/351/bmj.h5359

＊コホート＝cohort：古代ローマで歩兵隊という意味だった。この言葉は英語に入り込んで、隊、団、グループを意味するようになった。さらに統計学の用語として取り入れられ研究対象とする“群”やグループを意味するようになった。疫学は全面的に統計学の手法を取り入れており、自然にコホートという言葉も研究対象群という意味で使われている。

＊後ろ向きコホート研究：“後ろ向き”という言葉は日本語では否定的なニュアンスを持つが、疫学研究では別段否定的な意味をもつものではない。過去に発生した事例を調べ考究するという意味合いをもつ。

＊Gy は放射線の吸収線量の単位名称。ガンマ線やＸ線などの放射線を吸収したものとして通常１Gy＝１Sv と等値されるが、Gy と Sv（シーベルト）はもともと異なる概念である。Ｇｙは吸収線量の単位で科学的な概念だが、Sv は放射線から受ける“影響”の単位概念である。“影響”という条件によって大きく異なる事象を数値化することは、学術的にみて精確な科学的概念とはいえない。従って科学的な学術論文では、Sv（等価線量あるいは実効線量の単位名称）を使ってはならないことになっている。

＊過剰相対死亡率。人ががんで死亡する因子は様々である。ここでは、放射線被曝を因子として死亡するケースを特異的に特定してその率（たとえば 1000 人あたりの死亡）を求めている。これを過剰相対死亡率という。従って過剰相対死亡率は、放射線被曝が原因因子でがんのために死亡する率と考えていい。

＊中央値が 4.1mGy で平均積算線量が 20.9mGy だったということは、比較的少数の労働者の積算線量が相当高かったことを示している。

交絡因子を徹底的に排除

白血病を除くすべてのがんによる推定死亡率は積算被曝線量 Gy あたり 48%だった。10 年期間を採用した。（９０％信頼区間 20%から 79%）

同様の関連性は固形がんの死亡率にもみられた。（Gy あたり 47%。18%から 79%）

＊がんは固形がん、血液のがんに大別できる。固形がんはさらに上皮がんと非上皮がん（肉腫）に分類できる。

0-100mGy の被曝線量域についての相関関係は、推定ではあるがおそらくは、その被曝影響において全ての被曝線量域の相関関係と同じものとなるだろう。しかし精度においては劣る。

＊この論文では 0-100mGy の被曝線量域を低線量被曝としている。つまり低線量域の被曝線量とその影響との相関関係は、高線量域におけるそれと同様だと述べている。これは大変重要な指摘である。ICRP の公式見解では、広島・長崎の原爆被爆者寿命調査の研究（LSS）を基にして、被曝線量 100mGy 以上の領域では線量とがんの発生は直線的な関係（比例関係）があるのに対して、低線量被曝ではがんの発生と被曝影響には明瞭な因果関係が確認できないとしている。さらにこの説を一歩進めて、100mGy 以下の領域では放射線被曝の影響はない、としてきている。この論文では、100mGy 以下でも同様に線量と被曝影響には比例的な相関関係がある、という結論を出している。

喫煙や職業的アスベスト暴露が交絡因子となりうる。：しかしながら、肺がんや肋膜がんによる死亡を除外してみても、（研究結果に関する）推定関連性には影響がなかった。使用の放射線線量測定器の機能を明確にするために相当な努力は費やしてはいるものの、測定誤謬の可能性は依然として残る。

本研究が意味すること：本研究は、長期間にわたる電離放射線の低線量被曝と固形がん死との間の関連性に関してその直接推定材料を提供している。高線量被曝は低線量被曝に比べてより危険であると考えられてはいるが、放射線関連労働者の間のがんでの放射線被曝線量の単位あたりのリスクは、日本における原爆被爆生存者に関する研究に由来する推定と同様だった。

＊「日本における原爆被爆生存者に関する研究」：原爆投下直後からアメリカの軍部は、広島・長崎の原爆被爆者に対する放射線被曝影響に関する研究プロジェクトを開始した。当時アメリカ海軍長官が大統領トルーマンに対してこの研究の正式承認を求め（いわゆるトルーマン指令）、全米科学アカデミーの全米研究評議会（NAS-NRC）に調査研究を依頼し、NAS-NRC は軍事医学者を中心に専門の研究調査委員会を設立した。これが原爆傷害調査委員会（ABCC）である。ABCC は 1947 年から 1948 年にかけて広島と長崎に出先研究所を設け、本格的な調査研究活動を開始した。1950 年 1 月時点で生存していた原爆被爆者に関して、長期間の健康影響調査（原爆の一次放射線による外部被曝影響調査。従ってもともと高線量外部被曝影響に関する調査）が生存者寿命

調査（Life Span Study=LSS）である。現在 LSS に基づく研究が放射線被曝に関するもっとも権威ある研究とされているが、昔から LSS そのもの、さらに LSS にもとずく諸研究、さらに結論の出し方及びそれらに基づく放射線リスクモデルに関しては様々な批判がある。

国際的核推進機関オールスターの支援体制

長期間放射線被曝と発がんリスクの計量化は、放射線防護基準の強化に大いに役立つだろう。

研究資金、関心の喚起及びデータの共有などの支援は、以下の諸機関から得られた。アメリカ疾病予防管理センター（the US Centers for Disease Control and Prevention。アメリカ保健福祉省所管の総合感染症研究所）、日本厚生労働省（Ministry of Health, Labour and Welfare of Japan）、放射線防護・原子力安全研究所（Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire。フランスの原子力安全と放射線防護を目的とした商工業的公施設法人で、国防、環境、研究および産業および厚生労働大臣の共同監督の下で運営されている）、アレヴァ社（AREVA。フランスの世界最大の核コングロマリットでフランス政府の 99%出資法人）、フランス電力（ Électricité de France。フランス最大の電力会社。フランス政府が最大の株主で 58 基の原発原子炉を運転している）、アメリカ国立労働安全衛生研究所（National Institute for Occupational Safety and Health。労働省管轄で職場の安全衛生に関する規制を策定・執行）、アメリカ・エネルギー省（US Department of Energy。エネルギー保障と核安全保障を担当。役割は核兵器の製造と管理、原子力技術の開発、エネルギー源の安定確保、及びこれらに関連した先端技術の開発など幅広い）、イギリス公衆保健庁（Public Health England。イギリス保健省傘下。2013 年に既存の組織を再編して発足）。

データは国際がん研究機関（International Agency for Research on Cancer。世界保健機構の外部組織）において管理保管されている。

これで見ると国際的な核推進機関や組織がオールスターで研究支援体制を組んでいることがわかる。

原爆開発初期からの核労働者データを含む

はじめに（Introduction）

1943 年、大規模な核兵器開発計画が、そして後には核の産業利用開発がアメリカで開始された。（“核の産業利用”は原文では単に nuclear power。通常なら“原子力”と訳すところだが、nuclear power を“原子力”と訳すのには私は抵抗を感じる。“原子力”なら atomic power である。ところが日本では“nuclear power”を“原子力”と訳す慣習がある。どうも核と原子力は別物とする世論作りに使われてきたフシがある。核なら危険だが、原子力なら平和で安全、ということらしい。しかし原文は“nuclear power”であり、これを原子力と訳すことはできない。“核力”とすべきところだがこれでは日本語としてあまりにもこなれていない。そこで“核の産業利用”と訳すことになった）

そしてすぐに核開発計画はイギリス、フランスでも開始された。

*若干抵抗のある記述である。「マンハッタン計画」はもともとアメリカ、イギリス、カナダの三カ国共同核兵器開発計画であることを考えれば、アメリカとイギリスの核開発は同時期とみるべきであろう。

これら一連の諸計画は過去 70 年間で数十万人を雇用してきた。（アメリカの兵器級プルトニウム製造工場、ワシントン州ハンフォード核施設だけで、稼働開始から閉鎖まで約 50 万人の労働者を雇用した）

（wikipedia「ハンフォード・サイト」）

1990 年代、これら三カ国で放射線関連労働者の間の発がんリスクに関する国際的な研究が、共通のコアプロトコルを使用して実施された。この研究はその後 15 カ国を含むまでに拡大した。フランス、イギリス、アメリカの労働者の研究対象群は、初期の核産業労働者の利用可能な情報の大半を提供しており、これら研究対象群一人一人の情報は最新の情報に更新されてきた。

フランス、イギリス、アメリカの核産業労働者の研究対象群の更新情報はプールされて、「国際核労働者研究」の一部分として、がん死亡の疫学的分析が実施された。

＊国際核労働者研究：International Nuclear Workers Study＝INWORKS

これら研究対象群は、世界の核労働者の中でも最も大きくまた最も古くかつ最も情報豊かなグループである。これらは個人線量計を使って外部被曝がモニターされている男性及び女性を含み、死因に関する情報は数十年にわたって収集され追跡調査されてきた。ここに我々はすべてのがん死及び固形がん死に関する分析を報告するものである。リンパ性及び造血性のがん（白血病を含む）による死亡の分析については、すでに報告を終えているし、今後引き続き、非腫瘍性疾病及び特異な型の固形がんによる死亡の分析を報告する予定である。

我々が狙いとするのは、電離放射線の低線量被曝及び低線量被曝線量率被曝から成人を防護するための科学的基礎を強化することである。子宮内（in utero）低線量被曝の後のがんの影響に関する強力な証拠（エビデンス）、あるいは子どもの放射線診断の低線量被曝び関係することを支持する証拠はこれまでも存在したが、成人における低線量被曝の疫学的証拠はこれまではるかに限定的だった。

＊子宮内低線量被曝とがんの影響に関する強力な証拠の研究論文としてアリス・スチュアートらの論文が参照されている（注の８）

慢性の低線量被曝リスク定量化が狙い

方法：

国際コンソーシアム

INWORK は、電離放射線への慢性の低線量被曝リスクに対するより精確な定量的推定をもたらす基盤を提供するため設立された。中に含まれることとしては、（対象とする）労働者は最低１年以上核産業に雇用されていなければならず、個人線量計の使用によって外部放射線の被曝線量がモニターされていなくてはならない。フランスからは、３つの主要な雇用者からデータが入手された。：原子力・新エネルギー庁（Commissariat à l’énergie atomique。フランス政府機関で、軍需・民需を問わずに原子力の開発応用を推進）、アレヴァ・ニュークリア・サイクル（AREVA Nuclear Cycle＝AREVA NC。旧コジェマ。ラ・アーグ再処理工場とマルクール原子力地区に核燃料加工と再処理工場を保有）、フランス電力。イギリスからは、データは全英放射線労働者登録協会（The UK National Registry for Radiation Workers）。このデータはイギリス原子力兵器機関（the Atomic Weapon Establishment）、イギリス核燃料会社（British Nuclear Fuel plc.　2010 年に完全に整

理された)、イギリス原子力公社（UK Atomic Energy Authority)、ブリティッシュ・エナジー（British Energy Generation。かつてはイギリス最大の電力会社で 2010 年にフランス電力に買収された)、マグノックス社（Magnox Electric。全英 10 箇所のマグノックス炉原子力発電所の運営と廃炉に責任を持っている。うち 9 炉が廃炉中)、イギリス国防省など主要な核施設で働く労働者のデータを含んでいる。アメリカからは、エネルギー省傘下のハンフォード施設（Hanford Site)、サバンナ・リバー施設（Savannah River Site)、国立オークリッジ研究所（Oak Ridge National Laboratory)、アイダホ国立研究所（Idaho National Laboratory)、ポーツマス海軍造船敞（Portsmouth Naval Shipyard）などからデータが得られた。

フランスでは、フランス・データ保護庁（French Data Protection Authority）の要請によって、対象者にはデータ提供を拒否する選択権が与えられたが、一人として拒否しなかった。アメリカでは労働者のデータは既存の記録から取得できる。研究参加者との直接の接触はない。参加者のリスクは最小のため、アメリカ職業安全・保健庁（the National Institute for Occupational Safety and Health）の再検討委員会は告知に基づく同意要求を放棄している。イギリスの労働者も全英放射線労働者登録協会への参加や本研究への参加を拒否できる。拒否した人は 1%以下だった。

結腸の吸収線量で被曝線量を表現

被曝線量データ

電離放射線への職業被曝の個人モニタリング・データは、イギリスに置いては会社と政府、アメリカとフランスに置いては会社から取得できる。光子の形での放射線の透過での外部被曝による全身被曝線量を、個々人別に年間の定量的推定値として提供されている。特に断らない限り、この論文での被曝線量は、結腸（colon）の吸収線量であり、Gy（グレイ）で表されている。

これらの分析は、固形がん死と放射線被曝との関連を調べた最近の他の主要な諸研究との比較を容易にするために結腸吸収線量推定値を使用している。
ほとんどの作業の条件下で、外部被曝による吸収線量は、100k 電子ボルトから 3000k 電子ボルト（それぞれ 1.6e-ジュールから 4.8e-ジュール）の光子のエネルギーによるものだった。放射線荷重係数は 1 となる。従って、Gy で表示された吸収線量は等価線量として「Sv」で表現できることになる。

＊電離放射線の人体への影響は電離放射線のもつ電離エネルギーが人体に損傷を与える大きさで判定されている。つまり物理量のみで判定している。この研究論文も物理量で判定する手法の枠内

にいる。この論文では電離放射線の種類を光子に限定して研究している。光子の放射線とはＸ線やガンマ線などである。他に放射線の種類としては、電子線（ベータ線）、アルファ粒子線（アルファ線）、中性子線、重原子核線などがあり、それぞれ電離放射線のもつエネルギーが異なる。電離エネルギーの大きさを定量化するための単位は電子ボルト（eV）を使用する。この論文での研究対象者が被った外部被曝は光子によるもので、その吸収線量は 10 万電子ボルト（100k 電子ボルト）から 100 万電子ボルト（1000k 電子ボルト）だったとしている。

一方で放射線は種類によって、エネルギー密度が異なるとされる。全体としては同じエネルギー量でもエネルギーのまばらな放射線と密度の高い放射線がある。当然エネルギー密度の高い放射線の方が人体に与える影響が大きいわけで、エネルギーの密度（線エネルギー付与＝LET）によって人体に与える影響度に換算するため、放射線荷重係数が設定された。光子（X 線やガンマ線）の放射線荷重係数は「１」とされる。ちなみにベータ線（電子線。電子は粒子である）の荷重係数も「１」。一方アルファ線（陽子線。陽子も粒子である）の荷重係数は「20」である。こうして人体が吸収した放射線の人体への影響度が定量化されることになる。この単位は「Sv」（シーベルト）である。従って１Gy の光子線の人体への影響度は、１Gy×１（光子の放射線荷重係数）＝１Sv という等式が成立することになる。これが論文中この箇所でいう「等価線量」（equivalent dose）である。

実際には、放射線の人体への影響は、もっと複雑・ダイナミックであり、特に人体の組織や器を構成する細胞に対する影響は、エネルギー物理量のみを考慮するのではなく、もっと分子生物学的な影響を考慮しなくてはならない、とする批判も特に 2000 年代から非常に激しく起こっている。

なお吸収線量 Gy の単位の基礎はエネルギー一般の抽象概念であるジュール（J）である。すなわち「物質１kg が１J に相当する電離放射線を吸収したとき１Gy」とする。

我々は中性子線の推定値も使用した。中性子線の推定値は等価線量（Sv または rem）の形で記録されている。これは中性子線のモニタリング状況を構築するためにのみに使用した。

：果たして労働者は信頼するにたる記録された中性子被曝を被っているのであろうか？もしそうなら中性子被曝線量は全外部被曝線量の 10%をこえるのであろうか？

＊Sv は等価線量の単位であるが、1990 年の国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告で、Sv 及び Gy（グレイ）の単位が勧告される前は、rem(レム)と rad(ラド)の単位が使われていた。rem は等価線量の単位（線量当量）で、rad は吸収線量の単位。基礎概念は若干異なるのであるが、１Sv＝100rem、１Gy＝100rad の換算が使われている。ところがアメリカではいまだに rem／rad が一般的に使用されている。2013 年秋に前アメリカ原子力規制委委員会・委員長、グレゴリー・ヤツコ氏が来広した折、小さな講演会で講演してもらったことがあるが、ヤツコ氏は rem／rad の単位で話していた。この論文中この箇所は rad の単位で中性子線の被曝線量のデータを取得したとするが、これは当然アメリカの諸機関から入手したデータであろう。

我々は、労働者のトリチウムによる外部被曝線量の記録も入手していたがこれらデータは使わなかった。（無視した）

＊トリチウムはベータ線を照射するが、電離エネルギーが非常に弱く外部被曝で健康損傷が発生すると考えるのは現実的でない。トリチウムの危険は内部被曝にある。しかもトリチウムは電離エネルギーによる細胞損傷ばかりでなく、もっと分子生物学的な要因でも細胞損傷を引き起こす。

蓄積された核分裂物質を測定する利用可能な手段は様々であり、信頼できる生物検定の結果、確認された取り込み量の指標（たとえば、身体の一部の蓄積量あるいは摂取の年間限度）、または定められた預託線量などを含む。この目的で我々は、既知のあるいは疑わしい（放射性物質による）体内汚染の指標としてこれら手段をグループ化した。フランスとアメリカの労働者では、既知のあるいは疑わしい取り込みは確定できた。イギリスの労働者では内部被曝線量はモニターされていることが知られている。

死亡証明書などでがん死を確定

追跡調査及び死因の確定

決定的な状況が、国家または地域の死亡登録、雇用者の記録及び社会保障局の記録などとリンクして、それぞれフランスでは 2004 年、イギリスでは 2001 年、アメリカでは 2005 年の対象者を通じて確定された。原因死に関する情報は、死亡の確定時に死亡証明書や ICD-9（国際疾病分類第 9 版）で分類された死亡から抽出した。全てのがん死（ICD-9 分類 140-208）は検証された。というのは、放射線に由来するがんは起こりえてもすべてではない、もし全てではないなら、電離放射線の全身被曝線量を定置する必要があるからだ。また、死亡証明書の情報は集合としての全てのがん死を特定するに際して、個別のがん死を特定するよりもより精確であろうからだ。

我々は、白血病（ICD-9 分類 140-203）と固形がん（ICD-9 分類 140-199）を除外して、すべてのがんを検証した。これらのグループは放射線防護勧告で基礎となる研究に典型的に使用されているからだ。固形がんは、肺がんを除いて（分類 162 を除く 140-199）全て検証した。肺がんは紙巻きたばこ喫煙と強く関連があるからだ。肺がんの排除は、核産業界の労働者において喫煙が職業的放射線被曝と関連があるかも知れないとする懸念、放射線一発がん関連性の推定における主要なバイアスの一つ、を明快にする間接的な手法ともなった。

我々はまた、３つの大きなグループを排除して、放射線と固形がんの関連を検証した。一つは喫煙に関連した大規模なグループである。すなわち口腔、喉頭、咽喉、肺、食道、胃、結腸、直腸、肝臓、胆嚢、膵臓、鼻孔、子宮頸部、膀胱、腎臓、尿管のそれぞれに関係したがんである。（ICD-9 の分類では、140-151 を除く 140-199、153-157、160-162、180、183、188-189）

２つ目の、排除したグループは、肺、肝臓、骨に関係したがんのグループ。この３つの部位は蓄積したプルトニウムから相当な被曝影響を受ける。

＊プルトニウムでの健康損傷はほぼ内部被曝影響である。

３つ目の排除グループは、肺と肋膜に関係したがんのグループである。（162 と 163 を除く分類 140-199）これはアスベストに起因した職業的被曝のバイアスに対する懸念を取り除くためである。

対象者は、最初の被曝線量モニタリングの日、または雇用日から起算して１年後の日、いずれであれ遅い日から研究過程に入る。フランスの国家死亡登録は、1968 年以降の個人死因情報を提供する。

統計手法：

使用した統計手法は、以前の核産業労働者の国際的研究と同様である。

約３０万人中がん死は１万９７４８人

結論

本研究の人口集団は 30 万 8297 人だった。うち 6 万 6632 人が追跡調査完了時点で死亡していたことが知られている。うち 1 万 9748 人ががんで死亡したことが確認できている。（n=684:白血病、ｎ＝5802：肺がん）

このコホートの追跡調査は 820 万人・年にのぼり、労働者１人あたりの追跡年数の中央値は 26 年にのぼる。労働者 1 人あたりの勤務年数の中央値は 12 年だった。追跡調査終了時点の年齢の中央値は 58 歳だった。

ほとんどの労働者は男性（87%　n=268262）で、結腸の集団線量の 97%までが男性によるものだった。信頼にたる被曝記録のある 25 万 7166 人の労働者の結腸蓄積線量推定値は大きく幅がある。（中央値 4.1mGy、平均値 20.9mGy、90 位パーセンタイルは 53.4mGy、最大値は 1331.7mGy）合計結腸集団被曝線量は 5370.3Gy・人。

Table 1 | Characteristics of cohorts included in the INWORKS consortium (nuclear workers in France, UK, and USA, 1944-2005)

	France	UK	US	INWORKS
Calendar years of follow-up	1968-2004	1946-2001	1944-2005	1944-2005
Workers (no)	59 003	147 866	101 428	308 297
Person years (millions)	1.5	3.4	3.3	8.2
Causes of death (no)				
All causes	6310	25 307	35 015	66 632
All cancer	2552	7558	9638	19 748
All cancer other than leukaemia	2473	7350	9241	19 064
Solid cancer	2356	6994	8607	17 957
Solid cancer other than lung cancer	1761	4750	5644	12 155
Exposed workers (no)*	42 206	130 373	84 587	257 166
Collective dose (person Gy)	742.0	2936.1	1692.2	5370.3
Average individual cumulative dose (mGy)†	17.6	22.5	20.0	20.9

*Workers with cumulative dose greater than zero.
†Average estimated cumulative dose to the colon, among exposed workers.

Table 1　INWORKS の核産業労働者研究における研究対象者（コホート）の特徴
（フランス、イギリス、アメリカにおける核産業労働者　1944 年 -2005 年）

	フランス	イギリス	アメリカ	合計
追跡調査の暦年	1968 年 -2004 年	1946 年 -2001 年	1944 年 -2005 年	1944 年 -2005 年
核産業労働者数（単位は人）	59,003	147,866	101,428	308,297
観察人年 (単位は百万人年)	1.5	3.4	3.3	8.2
死亡原因（単位は人）				
全原因死	6,310	25,307	35,015	66,632
全がん死	2,552	7,558	9,638	19,748
白血病死を除く全がん死	2,473	7,350	9,241	19,064
固形がん死	2,356	6,994	8,607	17,957
肺がん死を除く固形がん死	1,761	4,750	5,644	12,155
被曝した労働者数 (単位は人)（注 1）	42,206	130,373	84,587	257,166
集団被曝線量 (人 Gy)	742.0	2,936.1	1,692.2	5,370.3
平均個人蓄積線量 (単位は mGy)（注 2）	17.6	22.5	20.0	20.9

注 1：蓄積線量が 0 以上の被曝線量の労働者
注 2：被曝労働者の結腸（colon) の平均蓄積被曝線量推定値
観察人年：追跡研究において疾病異常の発生頻度を測定するとき，個々の対象の観察期間が異なる場合がある。このとき観察期間を考慮にいれた分母を決める目的で考案された単位が人年法である。1 人 1 年間観察された場合、1 人年という。上記のケースでフランスの労働者 59003 人を 1 年間観察すると、59003 人年となる。

【参照資料】ブリティッシュメディカルジャーナル（BMJ）「Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation:retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS)」Table1
http://www.bmj.com/content/351/bmj.h5359

すべてのがんで、過剰相対率は 1 Gy あたり 0.51 だった。（90%信頼区間 0.23 から 0.82）白血病をのぞくすべてのがんでの過剰相対率は 1 Gy あたり 0.48（同 0.20 から 0.79）。固形がんは 1 Gy あたり 0.47（同 0.18 から 0.79）だった。喫煙による混同を間接的に評価して、肺がんをのぞく全ての固形がんを推定し（1 Gy あたり 0.46　同 0.11 から 0.85）、

推定値はほぼ全固形がん死と同様だったと我々はみている。アスベスト暴露による、あり得べきバイアスを評価してみても、肺がん死と肋膜がん死をのぞくすべての固形がん死の率は１Gy あたり 0.43（同 0.08 から 0.82）であり、すべての固形がん死と同様な結果が得られた。

喫煙による影響を排除したがん死は、推定過剰相対死亡率１Gy あたり 0.37（同 0.14 から 0.95）にも達する。喫煙に関係したがん死（固形がん死の 70%を構成する）の排除は、このように１Gy あたりの過剰相対死亡率の影響と精確度を減ずる結果となった。

Table 2 | Estimates of excess relative rate per Gy for death due to specific cancer categories in INWORKS*

Causes of death	No of deaths	Excess relative rate per Gy (90% CI)
All cancer	19 748	0.51 (0.23 to 0.82)
All cancer other than leukaemia	19 064	0.48 (0.20 to 0.79)
Solid cancer	17 957	0.47 (0.18 to 0.79)
Solid cancer other than lung cancer	12 155	0.46 (0.11 to 0.85)

*10 year lag assumption.

Table 2　がんの種類による過剰相対死亡率の推定値

死亡原因	死亡数（人）	1 Gy あたりの過剰相対死亡率（90% 信頼区間）
全がん死	19,748	0.51（0.23 から 0.82）
白血病死を除く全がん死	19,064	0.48（0.20 から 0.79）
固形がん死	17,957	0.47（0.18 から 0.79）
肺がん死を除く固形がん死	12,155	0.46（0.11 から 0.85）

※推定値は 10 年間ラグの推定

【参照資料】ブリティッシュメディカルジャーナル（BMJ）「Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation:retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS)」Table2
http://www.bmj.com/content/351/bmj.h5359

放射線感受性に関する分析は期間５年と期間１５年ついて実施し推定した。その影響度についての関連性は期間５年間の方がやや小さかった。モデルの適合性は先験的に入手していた期間１０年推定より劣っていた。関連性については、期間１５年が、それとよく似た適合性をもつ期間１５年で得られた適合性モデルがその影響度において若干大きかった。

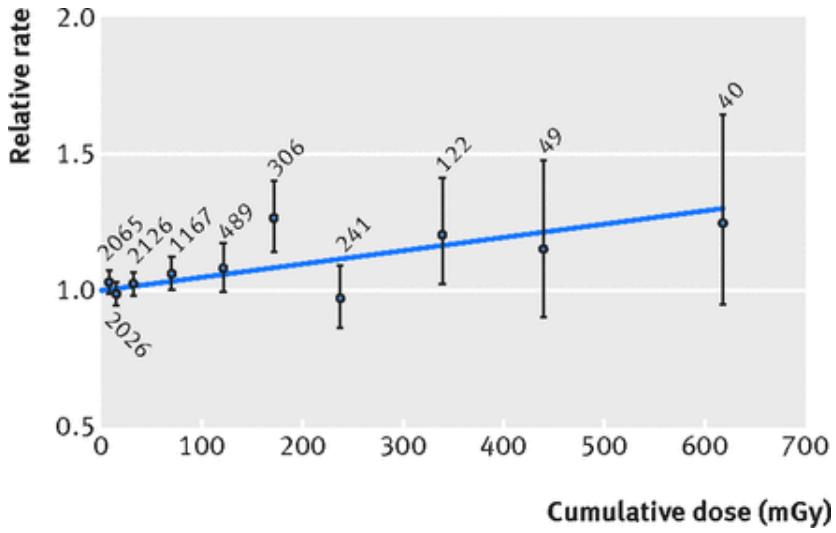
被曝に伴う相対過剰率の直線的増加を示すモデルは、目視での白血病以外のすべてのがんに関するデータについて合理的な説明を与えるように見える。（図１参照のこと）

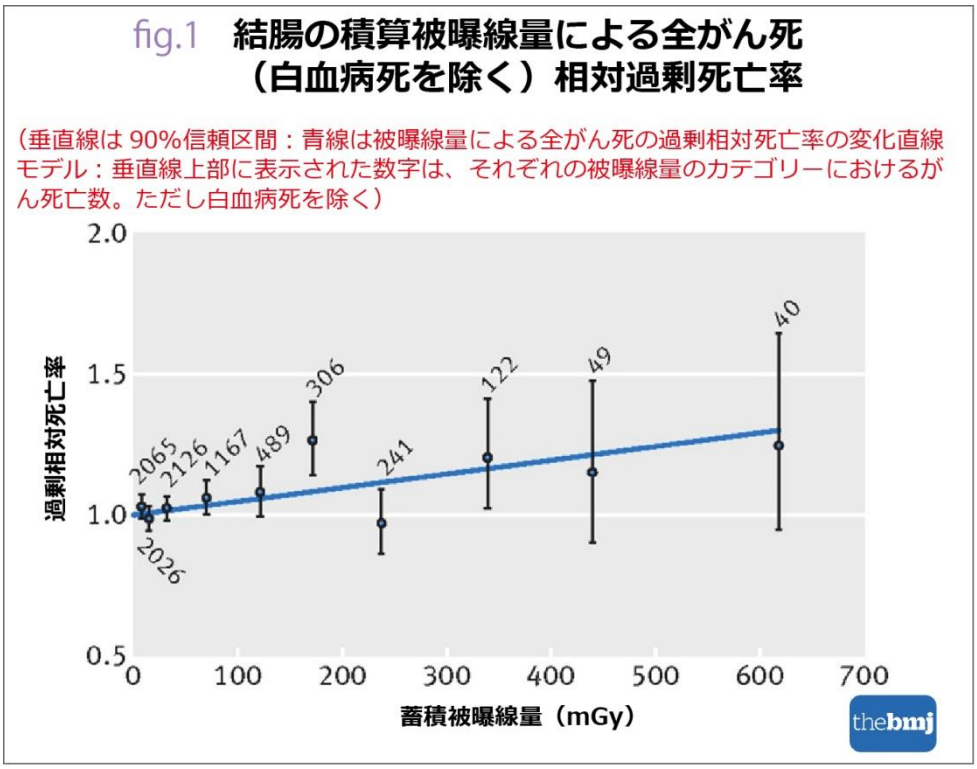
私たちが採用する適合モデルに基づけば、白血病をのぞくがんによる死亡１万９０６４人のうち、２０９人は外部被曝による過剰死だった。直線モデルから出発して公式に評価するため、蓄積線量の２乗パラメータを含むモデルを採用した。この包摂（蓄積線量の２乗パラメータを含むモデルの採用）は、モデル適合性（the model goodness of fit）においてほとんど改善がみられなかった。（尤度比検定：likelihood ratio test＝０．５８、自由度：df＝１、Ｐ値＝０．４４）

＊いずれも統計学で使用される用語で、私もよくわかっていない。よくわからないまま、公式的説明を書けば次のようになる。尤度 likelihood とは想定するパラメータがある値をとる場合に観測している事柄や事象が起こりうる確率のこと。尤度はパラメータの関数として表すことができるので尤度関数とも言う。尤度比検定（ゆうどひけんてい）は、２つのモデルの適合度検定を比較する仮説検定。すべてのパラメータが自由な無制約モデルと少ないパラメータを持ち、そのパラメータに関する帰無仮説の制約を受けるモデルを比較することで、どちらがサンプルデータによく適合しているかを判定する。自由度は自由に値を取れるデータの数のことを自由度と言う。サンプルサイズｎの標本の自由度はｎであり、基本的にはサンプルサイズがそのまま自由度となる。Ｐ値とは統計的仮説検定において帰無仮説の元で検定統計量がその値となる確率のこと。Ｐ値が小さいほど、検定統計量がその値となることはあまり起こりえないことを意味する。一般的にＰ値が 5%または 1%以下の場合に帰無仮説を偽として棄却し、対立仮説を採択する。（以上主として「統計 Web」の用語集を参照した）

低線量分野の蓄積被曝線量の傾向を評価するため蓄積線量０－２００mGy の限定された分野の関連性（すなわち蓄積線量とがん死の関連性）について推定した。（過剰死亡率は１Gy あたり１．０４、信頼区間０．５５から１．５６で９０%）。０－１５０mGy の蓄積線量では１Gy あたり０．６９（信頼区間０．１０から１．３０）、０－１００mGy では１Gy あたり０．８１（信頼区間０．０１から１．６４）

下図がその傾向をしめす図である。





【参照資料】同上 fig.1 http://www.bmj.com/content/351/bmj.h5359

直腸蓄積線量のカテゴリーで、白血病以外の全がん相対死亡率は INWORKS において１０年期間をとった。縦線は９０％信頼区間をしめす。青の直線が線量に伴う白血病以外の全がん死による過剰相対死亡率の変化に関する適合する直線モデルの線である。縦線に示された数字は、それぞれの蓄積線量カテゴリーにおける白血病以外の全がん死亡数。最低線量カテゴリーのがん死亡数（ｎ＝１０４３３）は、読みにくさの関係で数字を記載していない。

プールされたデータの概要推定に関するそれぞれの国のデータの影響を鑑定するため、一度に１カ国ずつ INWORKS コホートを除いていった。

フランスを除く１０年期間以下と白血病以外の全がん死との関連に関する推計は１Gy あたり０．４８だった。（信頼区間０．１９から０．８０で９０％だった。同じくイギリスを除くと１Gy あたり０．３９（－０．０３から０．８５）、同じくアメリカを除くと１Gy あたり０．５６（０．１９から０．９７）だった。統計学検定（尤度比検定＝０．２４、df＝２、P 値＝０．８９）に基づく国別推計関連性においては国別異質性は見られなかった。また）目視検定においても国別に大きな違いがなかったという結論を支持している。

＊ややこしいいい方をしているが、フランス、イギリス、アメリカの三カ国で、国別で大きな違いは見られなかった、という意味。

それぞれの国における主要な雇用主間の違い（外部被曝要因以外の違い）に起因するバイアスを鑑定するため、INWORKS 内のそれぞれの主要施設の特徴を調整したモデルを適合

させた。施設に係わるさらなる調整に関しては、重要性は小さいと見ている。施設の白血病を除く全がん死は信頼区間９０％（０．１３－０．７５）で０．４３。

労働者がすべての核種について、確実に摂取したのか、摂取の疑いがあるのか、あるいは計測されたのかを同定することによってさらに層理化（stratifying）した結果を検証した。この時白血病以外の全がん過剰相対死亡率は１Gy あたり０．４６（区間０．１７－０．７８）だった。同様にトリチウム核種を除いた全核種１Gy あたり０．４５（区間０．１６－０．７８）だった。

肺、肝臓、骨がん（bone cancer）以外の固形がんと放射線被曝との関連性についても推計した。骨がんの過剰率は１Gy あたり０．５１（区間０．１５－０．９１）である。そしてこのポイントにおける推計はすべての固形がん死過剰死亡率とほぼ似たものだった。

ヒトの間で発生するほとんどのがん死および集団被曝の９７％はヒトの間に結果として生ずるものであるがゆえに、ヒトに限定した分析の結果を検証した。

女性を除く全がん死（白血病を除く）の相対過剰死亡率は、全体よりも若干大きかった。女性の相対過剰死亡率は１Gy あたり０．５１（９０％信頼区間は０．２２－０．８２）。全 INWORKS 研究対象群の８７％（ｎ＝２６８５２３）は中性子の被曝を受けていないと報告されている。

私たちの主要な興味は、光子（photons）の形の放射線の、長期間にわたる（protracted）外部被曝浸透の影響にあった。ゆえに中性子の被曝を受けなかった労働者に限定した分析の結果を検証した。中性子に被曝しなかった労働者の過剰相対死亡率は１Gy あたり０．５５（区間０．１７－０．９５）だった。

同様に、全労働者の８３％（ｎ＝２５６７７２）は、体内に放射性物質の蓄積がないあるいは内部被曝をしていないとされているので、これらの労働者に限定した分析の結果を検証した。これら労働者の相対過剰死亡率は１Gy あたり０．７２（区間０．２９－１．１９）だった。

（以下次回）