

令和 2 年度原子力施設等防災対策等委託費
(低線量放射線による人体への影響に関する疫学的調査)
事業

(原子力規制委員会原子力規制庁委託調査報告書)

令和 3 年 3 月

公益財団法人 放射線影響協会

本報告書は、原子力施設等防災対策等委託費による委託業務として、
（公財）放射線影響協会が実施した「令和 2 年度原子力施設等防災対策
等委託費（低線量放射線による人体への影響に関する疫学的調査）事業
（契約書第 1 条で定めた委託業務題目）」の成果を取り纏めたものです。

令和2年度報告書目次

I. 概 要	2
1. 事業対象者に関する情報の更新等業務	2
1. 1 事業対象者の被ばく線量に関する情報の更新	2
1. 2 事業対象者の生死等に関する情報の更新	2
1. 3 事業対象者の死因情報の継続使用に関する手続き	2
2. がん罹患情報の取得	2
3. 疫学調査事業の課題と解析方針の検討	3
3. 1 調査における緊急作業者の取扱い方針の検討	3
3. 2 調査集団の設定方法と解析方法の検討	3
4. 委員会活動	3
5. 本事業の理解促進活動	3
5. 1 ホームページによる放射線疫学調査関連情報の周知	3
5. 2 国内外の論文投稿・学会発表	3
5. 3 ニュースレター	4
5. 4 第VI期調査シンポジウム	4
II. 事業内容	5
1. 事業対象者に関する情報の更新等業務	5
1. 1 事業対象者の被ばく線量に関する情報の更新	5
1. 2 事業対象者の生死等に関する情報の更新	5
1. 3 事業対象者の死因情報の継続使用に関する手続き	11
2. がん罹患情報の取得	11
3. 疫学調査事業の課題と解析方針の検討	13
3. 1 調査における緊急作業者の取扱い方針の検討	13
3. 2 調査集団の設定方法と解析方法の検討	14
4. 委員会活動	16
4. 1 放射線疫学調査 倫理審査・個人情報保護委員会	16
4. 2 放射線疫学調査 調査研究評価委員会	17
4. 3 放射線疫学調査 あり方検討会フォローアップ委員会	18
5. 本事業の理解促進活動	19
5. 1 ホームページによる放射線疫学調査関連情報の周知	19
5. 2 国内外の論文投稿・学会発表	20
5. 3 ニュースレター	21
5. 4 第VI期調査シンポジウム	22
巻末参考資料	25

I. 概 要

本年度は、平成 27 年度に策定した健康影響評価計画に基づき、調査対象者の生死等情報の把握を行うとともに、令和元年度から利用が可能になったがん罹患情報を利用するため「がん登録等の推進に関する法律」にもとづく手続きを行い、国立がん研究センターからリンケージデータを取得した。また、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の事故収束作業（以下、緊急作業と称する）に従事した作業者の取り扱いについて検討するとともに、今後の解析方針について検討した。さらに本事業の理解促進活動としては、平成 26 年度までに取得したデータをもとに解析した結果について学会発表、論文投稿等を行うとともに、ホームページ等により本疫学調査について情報発信した。

1. 事業対象者に関する情報の更新等業務

1. 1 事業対象者の被ばく線量に関する情報の更新

当協会放射線従事者中央登録センター（以下、中登センターという。）から 2019 年度（令和元年度）までの被ばく線量情報等の提供を受け、データベースに反映した。

1. 2 住民票の写し等の交付請求による調査対象者の住所地及び生死確認

本年度は、29,980 人の調査対象者について生死追跡調査を行い、1,367 市区町村に対し住民票の写し等の交付を請求し、全ての市区町村から計 29,980 人の調査対象者について住民票の写し等の交付を受ける等して回答を得た、データベースに反映した。

1. 3 事業対象者の死因情報の継続使用に関する手続き

統計法（平成 19 年法律第 53 号）第 33 条規定に基づき、調査票情報の継続保有の申請を行い、承認を受けた。

2. がん罹患情報の取得

本事業では、第Ⅶ期を開始した平成 27(2015)年度から、放射線被ばくによる健康影響、特にがん発生に及ぼす影響を評価する際、その評価指標としてがん罹患を用いることとしている。令和元年度に厚生労働大臣から許諾された 2016 年全国がん登録情報に関して国立がん研究センターから対象事業者のがん罹患情報を取得し、放射線疫学調査ファイルと合わせて利用するがん登録データベースを更新した。また、提供が開始された診断年 2016-2017 年全国がん登録情報について、同様に令和 2 年 5 月利用申請を行い、令和 3 年 1 月応諾された。その後、全国がん登録データベースとのリンケージを行い、がん罹患情報の更新を行った。

また、がん罹患リスクの解析のためにがん罹患情報を活用するシステム構築、記録線量から臓器線量への変換及び解析を効率的に行うためのシステム構築等、臓器線量を活用した疫学調査解析システムの構築を行った。

3. 疫学調査事業の課題と解析方針の検討

3. 1 調査における緊急作業者の取扱い方針の検討

第Ⅶ期の解析では福島第一原子力発電所事故に伴う緊急作業に従事した期間を含むこととなるので、その影響を調べるため、調査集団に含まれる個々の緊急作業者に対して、緊急作業による被ばく形態を調査するため、内部被ばくの被ばく核種の推定を含めて、外部被ばくと内部被ばくの内訳を調査し、調査集団に含まれる緊急作業者の緊急作業線量を通常作業線量に合算することの影響について分析した。さらに、緊急作業者を調査集団から除いた場合の実行可能性を調査するため、緊急作業者を含まないことにより生じるバイアスの影響、予想される放射線リスクを分析した。これらの結果をあり方検討会フォローアップ委員会および調査研究評価委員会において審議を行い、調査集団に緊急作業者を含めて追跡を行い、緊急作業線量の評価方法について検討を進めるという方針が了承された。

3. 2 調査集団の設定方法と解析方法の検討

第Ⅵ期調査におけるコホートの設定を受け、今後の調査における解析方針の検討を行った。特に「放射線疫学調査のあり方に関する報告書」（平成 28 年 12 月）で示された解析の実行可能性について検討を行うことを目的として、傾向スコアマッチングによる調査集団の設定、マッチングに用いた変数毎のリスクの比較、多重代入法による調整変数の補完と調整効果、新コホートにおける検出力、推定誤差等について検討した。

これらの結果をあり方検討会フォローアップ委員会および調査研究評価委員会に示し、調査集団の設定方法と解析方針の検討について審議を行った。

4. 委員会活動

本事業においては的確かつ円滑な実行を図る目的として、個人情報の取扱い及び疫学研究に係る倫理的事項に係わる「放射線疫学調査 倫理審査・個人情報保護委員会」、並びに調査研究計画、調査の実施、がん罹患情報の活用に係わる「放射線疫学調査 調査研究評価委員会」を設置した。また、「平成 28 年度疫学調査あり方検討会」が策定した報告書を踏まえ、「放射線疫学調査 あり方検討会フォローアップ委員会」を設置し、事業の進捗状況の確認を行った。

5. 本事業の理解促進活動

5. 1 ホームページによる放射線疫学調査関連情報の周知

調査結果等について広く周知し、事業対象者の協力を得るためにホームページ、放影協ニュース等による情報発信を行った。

5. 2 国内外の論文投稿・学会発表

国内外の機関に積極的に引用される調査として専門家に認知されることを目的に、論文投稿 7 編（共著論文 2 編を含む 5 編は公表済み、2 編は投稿中）を行うと共に学会発

表 10 回を行った。

5. 3 ニュースレター

インフォームド・コンセントを受けた全事業対象者約 8 万 2 千人に対して本調査の進捗状況を周知するため、ニュースレターを作成し郵送した。

5. 4 第VI期調査シンポジウム

第VI期調査までで得られた成果についての理解促進を図るため、低線量放射線及び疫学調査に関わるシンポジウムを開催し、コホート設定方法とコホート設定結果、疫学調査事業を実施する上での今後の課題と解析方法について発表を行った。

II. 事業内容

1. 事業対象者に関する情報の更新等作業

1. 1 事業対象者の被ばく線量に関する情報の更新

第VI期調査において設定されたコホート 78,798 人について、当協会放射線従事者中央登録センター（以下、中登センターという。）から 2019 年度（令和 2 年度）までの被ばく線量情報等の提供を受けた。また同コホートの最初に従事した際の事前登録に関する情報も提供を受け、被ばく線量情報と併せてデータベースに反映した。

1. 2 事業対象者の生死等に関する情報の更新

がん罹患調査、死因解析等のために、調査対象者の住所地及び生死の情報を可能な限り最新の状態に保つ必要がある。調査対象者の住所地及び生死の確認（以下、「生死追跡調査」という。）は、前年度に引き続き、個人情報保護に留意しつつ、全国の市区町村（特別区及び政令市の行政区を含む。以下、同様。）から住民票の写し等を取得することにより行い、その結果の集計及び放射線疫学調査ファイルの更新を行った。

(1) 生死追跡調査

本調査の健康影響評価計画を策定した平成 27 年度時点の住民基本台帳法において、消除された住民票（以下、除票と言う。）の保存期限は 5 年と定められていたことから、1 人の調査対象者について少なくとも 4 年に 1 度、住民票の写し等の取得による生死追跡調査を行うこととしていた。一方、令和元年 6 月 20 日に同法が改正され、住民票の除票の保存期間が従来の 5 年間から 150 年間に延びた。しかしながら、本調査においてはがん罹患データの取得において最新の住所情報が必要であることから、今後も前年度までと同様に少なくとも 4 年に 1 度の取得を行う。

本年度は平成 27 年度から実施している意思確認調査において、本疫学調査の対象者となることに同意した 81,355 人のうち、29,980 人、について生死追跡調査を行った。

以下に、本年度の生死追跡調査の結果を報告する。

1) 住民票の写し等の交付請求及び取得

i) 住民票の写し等の交付請求

本年度は、(a)本年度中に当該調査対象者についての直近の生死追跡調査から 4 年が経過する者（平成 28 年度の生死追跡調査で住民票の写しを取得した者のうち、平成 31 年度に交付請求を行わなかった者）及び 3 年が経過する者（平成 29 年度に住民票の写しを取得した者）の内の一部の者、(b)前年度（平成 31 年度）の生死追跡調査において住民票の写し等の交付請求先の市区町村から他の市区

町村への転出が判明した者並びに(c)前年度（平成 31 年度）またはそれ以前の生死追跡調査において「該当者なし」等の理由で住民票の写しを交付されなかった者の内、再調査を行うこととした者、新規調査対象者、並びに前年度（平成 31 年度）までに実施した意思確認調査において郵送した説明資料が配達されずに協会に返送された者の内、住所の再調査を行うこととした者、計 29,880 人の調査対象者について、1,367 市区町村に対し住民票の写し等の交付を請求した。

なお、本年度、住民票の写し等を請求した者には、前年度までに意思確認調査に回答していなかった者及び同調査において本放射線疫学調査の調査対象者となることに同意しない旨の回答をした者は含まれていない。また、前年度までに同意書が無いとの理由で住民票の写し等の交付を受けられなかった市区町村に住所を持つ調査対象者については、意思確認書の写しを添えて、住民票の写し等の交付請求を行った。

本年度、住民票の写し等を請求した調査対象者の内訳は**表 1. 1**の通りである。

ii) 住民票の写し等の取得

i) の住民票の写し等の交付請求により取得した住民票の写し等及び取得できなかった住民票の写しは、その内容により以下の通りの区分に分類し、整理している。

- ①住民票の写しの取得（氏名、住所等が変更されていないもの）
- ②住民票の写しの取得（氏名、住所等が変更されているもの）
- ③除票の写しの取得（死亡による消除）
- ④除票の写しの取得（転出（海外への転出を含む。）による消除）
- ⑤住民票なし（「該当者なし」（調査対象者が当該の市区町村の住民ではなく、当該調査対象者の住民票が作成されていないことによる）のため）
- ⑥住民票なし（住民票の消除後 5 年（保存期限）以上経過のため）
- ⑦除票の写しの取得（不在住等の事由による市区町村長の職権による消除）
- ⑧その他

本年度は、住民票の写し等の交付を請求した 1,361 市区町村の全ての市区町村から、計 29,980 人の調査対象者について、住民票の写し等の交付等による回答を得た。本年度に住民票の写し等の交付を請求した調査対象者について、取得した住民票の写し等及び取得できなかった住民票の写し等の内訳は**表 1. 2**の通りである。

【巻末参考資料 27 頁 表 1. 1 参照】

表 1.1 本年度に住民票の写し等の交付を請求した調査対象者の内訳

請求の内訳	人数
(a) 前回住民票の写し ^{注-1}	27,929
(b) 前回転出除票の写し ^{注-2}	1,973
(c) 前回「該当者なし」等 ^{注-3}	78
合計	29,980

注-1 直近の生死追跡調査から4年が経過する者（平成27年度の生死追跡調査において住民票の写しを取得した者のうち平成31年度に交付請求を行わなかった者）及び3年が経過する者（平成29年度に住民票の写しを取得した者）の内の一部の者の調査

注-2 前年度（平成31年度）の生死追跡調査において他の市区町村への転出が判明した者の調査

注-3 前年度（平成31年度）またはそれ以前の生死追跡調査において、「該当者なし」等の回答を得た者の内の一部の者の再調査

表 1.2 本年度に取得する等した住民票の写し等の内訳

（令和3年3月現在）

区分	人数
住民票の写し ①②	27,764
除票の写し（転出） ④	1,301
内、国内の他市区町村への転出	1,294
内、海外への転出	7
除票の写し（死亡） ③	906
該当者なし等 ⑤⑥⑦	9
不交付	0
合計	29,980

2) 生死追跡調査の状況

平成 27 年度から実施してきた意思確認調査が本年度に終了することを受け、次年度以降の生死追跡調査対象者について、放射線疫学調査ファイル（以下、「疫学 DB」という）の状況とともに整理した。これまでの疫学 DB は全調査対象者 277,128 人（男性 274,559 人、女性 2,569 人）から構成されており、そのうち生存が確認された対象者の一部について年度ごとに生死追跡調査を実施し、その調査結果について疫学 DB を更新してきた。平成 27 年度から意思確認調査を実施することにより、疫学 DB は新規に調査対象者となった 14,853 人（男性 14,514 人、女性 346 人）を加えて 291,981 人（男性 289,066 人、女性 2,915 人）となった。今後の生死追跡の対象者はすべて本疫学調査の対象者となることに同意した者となるため、疫学 DB の内訳は令和 2 年 3 月現在で次の通りとなった。(1) 生存者は 80,055 人（男性 79,218 人、女性 837 人）、(2) 死亡者は 35,048 人（男性 34,956 人、女性 92 人）、(3) 調査の結果追跡できなくなった者は 140,632 人（男性 139,497 人、女性 1,135 人）となった。意思確認調査において不同意の意思を表明した者、意思確認調査を実施できなかった者及び回答がなかった者等が合わせて 92,110 人（男性 91,502 人、女性 608 人）であり、平成 15 年度から平成 21 年度までの間に実施した「説明と同意の確認」調査において、本年度までに同意しない旨の回答をした者及び郵送した説明資料が不達となり最終的な意思の確認がなされなかった者が 13,212 人（男性 13,024 人、女性 188 人）であった。なお、(4) 事業所に照会した時点で住所情報が得られず、当初から生死追跡調査の対象とならなかった者は 36,246 人（男性 35,395 人、女性 851 人）である。

詳細は表 1. 3 の通りである。【巻末参考資料 28 頁 表 1.2 参照】

3) 住民票の写し等取得の年度推移

全国の市区町村から住民票の写し等を取得することによる生死追跡調査を開始して 30 年が経過した。その間に得た各年度の住民票の写し等取得実績の推移を図 1. 1 に示す。

4) 生死追跡調査における「脱落」等の発生

i) 追跡先住所不明

住民票の写し等の取得による生死追跡調査において、市区町村から「該当者なし」という回答を受けた調査対象者の一部については、前年度までに取得した最新の住民票の写し等を当該市区町村に提示し、再度、住民票の写し等の交付請求を行った。他市区町村への転出が判明した者については、次回の調査までに除票の保存期間である 5 年を超えることのないよう、必要に応じて追加の住民票の写し等の交付請求を行った。

しかしながら、調査対象者が転出元又は転出先の市区町村で転出又は転入の

手続きをしないこと等により、調査対象者の追跡先の住所が不明となることがあるため、「脱落」が発生することがある。

本年度は9人（本年度調査分の0.03%）の「脱落」があった。

ii) 海外転出

海外への転出が判明した調査対象者については、以降の追跡が困難であるため、生死追跡調査を継続しないこととしている。

本年度は7人（同0.02%）の海外転出があった。

iii) 住民票の写し等の不交付

住民票の写しの交付制度等の見直しのために改正された住民基本台帳法が平成20年5月に施行されたことにより、以降、市区町村の判断によっては、住民票の写し等が交付されない可能性が生じた。住民票の写し等の請求先となった市区町村に対しては、本疫学調査の意義を説明すること等により、市区町村の理解及び協力を得ることに努めているが、やむを得ず住民票の写し等が交付されない場合は、当該の調査対象者の同意書を添付して交付請求を行うこととしている。

前述の通り、不交付はなかった。

表 1.3 生死追跡状況（既存の調査対象者）

（令和3年3月現在）

追跡結果	人数（男 女）
(1) 生存	79,136 (78,301 835)
(2) 死亡	35,954 (35,860 94)
(3) 脱落	140,635 (139,500 1,135)
（脱落の内訳）	
初回追跡時脱落 ^{注-1}	24,655 (24,365 290)
住所不明等 ^{注-2}	9,999 (9,953 46)
不同意 ^{注-3}	12,480 (12,292 188)
郵便不達 ^{注-4}	732 (732 0)
IC 不同意 ^{注-5}	13,122 (13,006 116)
IC 郵便不達 ^{注-6}	1,185 (1,164 21)
IC 未回答等 ^{注-7}	77,794 (77,323 471)
不交付 ^{注-8}	668 (665 3)
(4) 住所情報無し ^{注-9}	36,256 (35,405 851)
合計	291,981 (289,066 2,915)

注-1 原子力事業者から入手した住所情報に基づいて初めて行う住民票の写し等の請求において、該当者なし、除票の保存期間経過、職権消除等の理由で、住民票の写し等を取得できずに脱落した調査対象者の数

注-2 一旦、住民票の写し等を取得した後の再調査において、該当者なし、除票の保存期間経過、職権消除、海外転出等の理由により脱落した調査対象者の数

- 注-3 第2次交絡因子調査又は「説明と同意の確認」調査において、調査対象者となることに同意しない旨の回答をした者の数
- 注-4 「説明と同意の確認」調査において、郵送した説明資料が不達となり最終的な意思の確認がなされなかった者の数
- 注-5 「意思確認調査」において、不同意の意思を表明した者の数
- 注-6 「意思確認調査」において、郵送した説明資料が不達となり最終的な意思の確認がなされなかった者の数
- 注-7 「意思確認調査」において、回答がなかった者、回答に不備がある等で最終的な意思の確認がなされなかった者の数
- 注-8 市区町村の協力を得られなかったことにより、住民票の写し等を取得できなかった調査対象者の数
- 注-9 原子力事業者から住所情報を入手できなかったため、当初から住民票の写し等の取得による生死追跡調査の対象とならなかった者の数

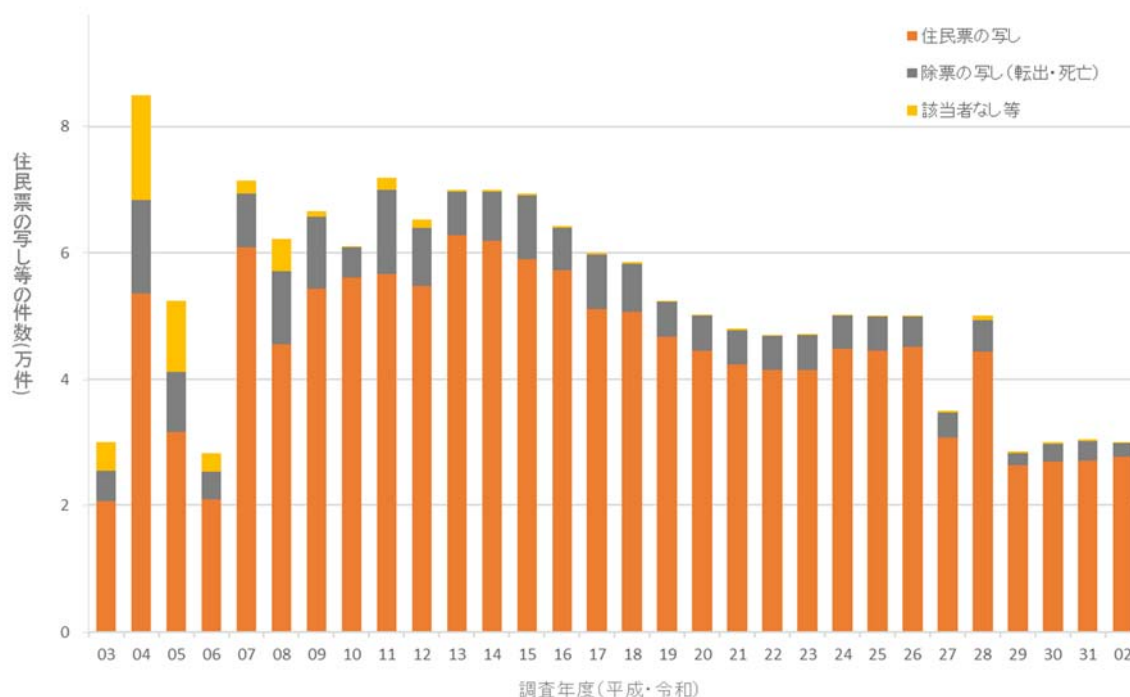


図 1.1 住民票の写し等の取得実績

(2) 放射線疫学調査ファイルの管理等

本疫学調査の実施に当たっては、平成 11 年 3 月までに放射線業務従事者として登録した者のうち調査対象者となった 277,128 人についての情報を収めたデータベースを、インターネット及び協会の計算機ネットワークから独立した計算機上に構築している。このデータベースの管理のために開発した「放射線疫学調査に係る情報処理システム」(以下、「情報処理システム」という。)により、年度毎に行う生死追跡調査の対象者の抽出、市区町村長に提出するための住民票の写し等の請求書類の作成、交付を受けた住民票の写し等の記載事項等の計算機への入力並びにデータベースに登

録された情報の更新及び修正を行っている。

本年度の生死追跡調査において入手した住民票の写し等の情報に基づき、29,980人の調査対象者について、データベースを更新した。そのうち、転居による住所の変更又は氏名の変更があった者は1,343人、転出による住所変更があった者は1,301人、死亡した者は906人、該当無し等により追跡できなかった者は9人であった。

また、このデータベース及び情報処理システムについては、定期的に保守点検を行うことにより、その正常維持を図るとともに、データのバックアップを定期的に又は適宜行い、データを適正に保管している。

1. 3 事業対象者の死因情報の継続使用に関する手続き

統計法（平成19年法律第53号）第33条規定に基づき、令和2年3月26日に調査票情報の継続保有の申請を厚生労働省に対して行い、令和2年3月27日に承認を受けた。これらの死因情報を用いて解析を行い、学会発表及び論文作成を行った。

2. がん罹患情報の取得

本疫学調査では、これまで主に、被ばく線量とがん死亡との関係を解析することで、低線量放射線の健康影響を評価してきたが、医療技術の進展等に伴いがんの致死率（致命率）が低下している現状を考慮し、健康指標として死亡だけでなく、がん罹患も調査することにより、より精度の高い健康影響の評価を行う必要性が高まっている。一方、がん罹患情報に関しては、一部の都道府県で地域がん登録制度があったものの、本疫学調査の対象者は全国に所在しているので、全員を対象としたがん罹患情報の把握は困難であったが、平成28年1月全国がん登録制度が発足した。これらの状況を鑑み、平成27年度からの調査においては、放射線被ばくによる健康影響、特にがんの発生に及ぼす影響を評価する際、その評価指標としてがん罹患を新たに加えることとしている。

平成27年度においては、全国がん登録制度に基づくがん罹患情報を活用するため、法的根拠、申請手続、全国がん登録データベース届出項目、利用可能時期、疫学調査解析での利用法等について調査研究評価委員会において審議した。特に、調査対象者のがん罹患情報の収集方法に関しては、収集項目等並びにがん罹患情報の保管及び管理のためのシステム開発の要件定義として、全国がん登録データベースから提供を受ける項目を確認した。

平成28年度には全国がん登録データベース整備の進捗状況、利用手続マニュアル等の整備状況、本疫学調査での利用可能時期等について調査研究評価委員会において審議した。また、がん罹患リスクの評価に用いる臓器線量構築について検討を行った。

平成29年度においては、調査研究評価委員会において、全国がん登録データベースの利用申請方法等について検討を行った。また、臓器線量構築検討会を設置し臓器線量への変換方策等について検討した。

平成30年度においては、調査研究評価委員会において、公開された2016年全国がん

登録の概要について検討を行った。また、臓器線量構築検討会において、記録線量から臓器線量への換算係数を構築した。

令和元年度においては、提供が開始された診断年 2016 年の全国がん登録情報について、法第 17 条第 1 項第 3 号の規定に基づき、利用申請を行い、承認後にリンケージを行った【巻末参考資料 30 頁 図 2.1 参照】。当協会は、省令により提供を受けることができる機関として定められており、法第 17 条第 1 項第 3 号の規定に基づいて、「非匿名化情報」の利用申請を行った。調査研究評価委員会等において、公表された 2016 年全国がん登録情報の精度、並びに疫学調査データベースと全国がん登録データベースのリンケージ結果データの集計方法等について検討を行った【巻末参考資料 30 頁 図 2.2 参照】。また、前年度の臓器線量構築検討会報告書に基づき、第 V 期解析対象者について、1957～2010 年の記録線量から臓器線量への試算を行った。

2. 1 全国がん登録情報の更新

診断年 2016-2017 年全国がん登録情報について、令和 2 年 5 月、当協会理事長から厚生労働大臣あての全国がん登録情報の提供の申し出を、事前相談の上、国立がん研究センターに対して行った。6 月にがん登録部会（web 開催）が開催され、8 月に審議継続の審査結果を厚生労働大臣から受領した。次いで、10 月に利用と提供に関する審査委員会（持ち回り）、11 月にがん登録部会が開催され、令和 3 年 1 月に応諾の通知を厚生労働大臣から受け取った。その後、調査研究対象者と全国がん登録情報をリンケージするために、リンケージ用外部照合データ約 26 万件を作成し、国立がん研究センターに送付した。リンケージの結果、がん罹患情報を付加したリンケージ結果データが提供された。提供された情報に基づいてがん登録データベースを更新した。

また、令和 2 年度においては、提供された全国がん罹患情報を疫学調査解析システムに取り込んで、がん罹患を評価指標として放射線リスクを推計できるように、がん登録データベースを導入した。

2. 2 臓器線量の再構築等の活用方策について

本疫学調査では、評価指標として従来の死亡に加え、平成 28 年に始まった全国がん登録制度のがん罹患情報を利用することとしている。線量については、従来、記録線量である個人線量当量をそのままリスク推定に用いていたが、放射線リスク評価の国際比較可能性を高めるために、新調査では臓器線量を用いることとして、平成 29 年度及び 30 年度に臓器線量構築検討会を設置した。平成 30 年度は、線量計レスポンスの試験の実施、日本人成人男性モデルの臓器線量換算係数の推計、日本の原子力発電所における光子エネルギー、ジオメトリ分布に関する先行研究の調査を経て、2 年間の検討の結果、記録線量から臓器線量への換算係数の構築方法をまとめ、検討会報告書を取りまとめた。令和元度は、臓器線量構築検討会報告書の換算係数に基づき、第 V 期解析対象者について 1957～2010 年の記録線量から臓器線量への試算を行った。

令和 2 年度においては、試算した臓器線量を用いて第 V 期対象データの再解析を行

い、喫煙の交絡に関する分析において、従来の記録線量を用いた結果と整合的であることを確認した。また、臓器線量構築検討会報告書で取りまとめた臓器線量換算係数を用いて、14種類の組織・臓器吸収線量を作成することによって、解析システムへの臓器線量解析機能を追加した。

3. 疫学調査事業の課題と解析方針の検討

3. 1 調査における緊急作業者の取扱い方針の検討

本疫学調査は放射線業務従事者の職業被ばくによる健康影響を分析対象としている。第V期解析は観察期間 1991-2010 年であったので通常作業線量のみを分析対象としていたが、第VI期以降の調査では、2011年3月の福島第一原子力発電所事故に伴う緊急作業に従事した期間を含むこととなった。一方、緊急作業線量は、通常作業線量とは線量限度が異なり、また、内部被ばく線量を含んでいた。したがって、調査における緊急作業者の取扱い方針を決定する必要があるあった。

そこで、緊急作業線量の実務、評価等について専門家からのヒアリングを踏まえて、緊急作業者及び緊急作業線量の取扱い方針の検討を行った。①中央登録センターのデータベースにおける緊急作業線量の取扱いを整理した。第VI期解析対象者男性 77,993 人について、提供を受けた緊急作業データに関して、2010-2015 年度に線量記録をもつ緊急作業者は 4068 人であった【巻末参考資料 3 1 頁 図 3.1、3.2 参照】。②中央登録センターへの定期線量報告では、実効線量（外部・内部線量の合算）のみが報告されている。一方、東京電力公表資料からは、内部被ばくは 2010-2011 年度にみられることが確認できた。③各種事故報告書より、水蒸気爆発に伴う放射性核種の放出により、事故直後は I-131、Cs-137 等が高濃度であったため、吸入・摂取により内部被ばくを受け、その結果 600mSv 近い線量評価もあることがわかった。一方で、内部被ばくは主に I-131 摂取に伴うもので、甲状腺に集積することから、甲状腺吸収線量は大きくなるが、本疫学調査でがんリスク推定の対象となる他の組織・臓器への影響は小さいことが知られている。したがって本検討では、内部被ばくによるリスク係数への影響は無視した。④原子力事業者が、従事者指定解除を行った者について中登に報告した外部・内部線量別被ばく履歴（俗称公文）を利用して、2010-2011 年度の個人別緊急被ばく線量を外部・内部被ばく線量に分割推計した。

取扱い方針の検討結果の要旨は以下のとおりであった。第一に、緊急作業線量が通常作業線量とは態様が異なるという理由で、緊急作業者を調査対象から除外する方法は適切ではなかった。第VI期コホート(77,993 人)から高線量の者が多い緊急作業者を除外すると、累積線量分布(2018 年度末)の高線量群のウェイトが小さくなり、分布の偏りが生じた【巻末参考資料 3 2 頁 表 3.1 参照】。また、第V期追加解析(観察期間 1991-2012 年)の ERR/Sv（白血病を除く全がん死亡）は、緊急作業者を除外すると 20%増加し、リスク分析への影響が大きかった【巻末参考資料 3 2 頁 表 3.2 参照】。

第二に、第VI期解析対象者の通常作業線量に緊急作業線量を加えても【巻末参考資料 33頁 表3.3、図3.3参照】、累積線量分布はほとんど変化せず、リスク分析には影響を与えなかった。緊急作業線量のうち外部線量を通常作業線量に加えても第VI期対象者の累積線量分布(2018年度末)はほとんど変わらなかった【巻末参考資料 34頁 図3.4参照】。これは、集団線量(1957-2018年度)で見ると緊急作業線量が占める割合が6.4%に過ぎなかったことによる【巻末参考資料 34頁 図3.5参照】。また、第V期追加解析(観察期間1991-2012年)のERR/Sv(白血病を除く全がん死亡、累積線量のラグ0年)は、緊急作業線量を加えてもほとんど影響が見られなかった【巻末参考資料 35頁 表3.4参照】。以上から今後の方針として、緊急作業線量を通常作業線量に加えた職業被ばく線量を用いてリスク解析を行うことが妥当であると結論付けた。

この検討結果を、あり方検討会フォローアップ委員会および調査研究評価委員会において審議を行い、調査集団に緊急作業者を含めて追跡を行い、緊急作業線量の評価方法について検討を進めるという方針が了承された。

3. 2 調査集団の設定方法と解析方法の検討

平成28年12月に策定した「放射線疫学調査のあり方に関する報告書」では以下のとおり、調査対象集団の中にリスク探索を目的とした部分集団を設定する方針が示された。

母集団のうち調査同意が得られた放射線業務従事者で構成される調査対象集団(以後、コホート集団という)と、コホート集団のうち高線量(50mSv以上)群を基準として、放射線以外の要因をマッチさせた部分集団の2つの調査集団を設定する。前者は、放射線被ばくによる健康リスクと放射線放射線以外の生活習慣の要因による健康リスクとの比較を行うことを目的とし、後者は、放射線以外の要因に影響されることなく小さい低線量放射線のリスクを探索することを目的とする。

同報告書において部分集団は2変数、例えば出生年と従事開始年度によるマッチングにより設定し、ERR/Svの変化を検討した。しかしこの方法ではマッチングに用いた2変数以外の変数を考慮できないため、今年度は多くの変数を傾向スコアとして集約した傾向スコアマッチングを行った。

傾向スコアマッチングの対象者は第VI期で設定したコホート77,993人とした。50mSv以上1人について50mSv未満から4人を抽出するマッチングを行った。また、マッチングに用いた変数は第VI期で実施した生活習慣等アンケート調査のすべての回答、及び回答から算出できる喫煙指数、ボディマス指数等とした。マッチングの結果、線量群間で出生年、喫煙等の分布を均一にするという点ではある程度成功したが、対象者数は77,993人から26,280人と著しく減少した【巻末参考資料 36頁 図3.6参照】。

同報告書において部分集団を設定するとした根拠は、第V期コホート20万人において白血病を除く全がんで有意に高いERR/Svが見られ、モデルによる調整では有意性が消失しなかったがマッチングでは消失し、これはマッチングで未知の交絡因子も調整できたと考えたことによる【巻末参考資料 36頁 図3.7参照】。

ここでマッチングとモデルによる調整の比較に用いた出生年、従事開始年度、従事開始年齢、雇用機関は、第V期コホート20万人で使用可能であった変数である。マッチングでERR/Svが下がったことは、未知の交絡因子も調整できた可能性もあるが、一方でERR/Svの比較に用いた出生年等の変数が強いリスク因子ではなかったため、調整効果（ここではERR/Svを下げる効果）が弱かった可能性も考えられた。この検証のために第2次生活習慣等アンケート調査回答者を対象として、喫煙、教育年数を含めて変数毎のがん死亡相対リスクの大きさを確認した。この結果、喫煙、教育年数では有意差が見られたがマッチングに用いた変数では有意差が見られず【巻末参考資料 37頁 図3.8参照】、同報告書において、モデルによる調整でERR/Svが下がらなかった理由は、検討に用いた変数が調整効果の弱い変数であった可能性が示唆された。

この結果から、第V期コホート20万人において、調整効果が大きい変数で調整できたならばERR/Svが十分下がった可能性が考えられた。図3.8に示すとおり、また、これまでの解析結果から喫煙、教育年数は調整効果の大きい変数であることが分かっている。第V期コホート20万人において喫煙データを有する者は7.5万人(37%)、教育年数データを有する者は4.3万人(21%)であるため、これらのデータを有しない者については、多重代入法によりそのデータを補完した。補完に用いた変数は出生年、所属事業所数、最終生死確認地(県)、従事開始年度、最新従事年度、2010年度までの累積線量、がん死亡フラグ(がんで死亡=1、それ以外=0)とし、作成疑似完全データセット数は10とした。その結果、喫煙、教育年数とも補完前とほぼ等しい分布で補完できた【巻末参考資料 37頁 図3.9参照】。

喫煙、教育年数の補完後にそれらで調整した場合、白血病を除く全がんのERR/Svは大きく減少し、喫煙で調整した場合、有意性は消失した【巻末参考資料 38頁 表3.5参照】。

この結果から、マッチング導入の検討に用いた変数は、調整効果が不十分であったため、ERR/Svが下がらなかった可能性が考えられた。調整によりERR/Svが下がる理由は累積線量と正の相関を形成していること、例えば喫煙では高線量群ほど高喫煙割合となっていることである。第VI期で設定した新コホートにおいても高リスク群である現在喫煙、教育年数が1-9年、10-12年の群が累積線量との正の相関を形成しており【巻末参考資料 38頁 図3.10参照】、今後の解析において、十分な調整効果が期待できる。

新コホートにおいて ERR/Sv を原爆被爆者から得られた 0.35 と仮定した場合、2035 年度の検出力は 0.55、標準誤差は 0.2 と推測された【巻末参考資料 38 頁 図 3.11、39 頁 図 3.12 参照】。

これらの結果は、原爆被爆者の調査で得られたリスク推定値との比較が可能となることを示している。

新コホートを対象とした今後の解析においては、モデルによる調整をメイン解析とし、マッチングは補助解析と位置付けることが妥当と考えられた。

4. 委員会活動

4. 1 放射線疫学調査 倫理審査・個人情報保護委員会

(1) 令和 2 年度第 1 回委員会（令和 2 年 12 月 2 日開催）議事

委員会では以下の事項について報告し、指導を受けた。

1) 審議事項

i) 第 VII 期調査計画における「健康影響評価計画書」について（審議事項）

2) 報告事項

ii) 韓国との共同研究について

iii) 第 VI 期調査での調査対象者となることに同意した方へのニュースレターについて

議事)

i) 第 VII 期疫学調査計画の承認について

第 VII 期調査を実施するにあたり第 VII 期の「健康影響評価計画書」の承認を委員会から得る必要がある。

第 VII 期調査は第 VI 期調査の延長にあるので、基本的な考え方の変更はないが、計画書中の国内外の研究機関との共同研究で提供し合うデータについて「集団データ」という表現ではなく、個人データに戻すことができないデータであることを明確にするために「統計データ」という表現を用いること。また、その際に個人データに戻すことができないので、誤解を招かないように「個人を特定できない」という表現は割愛することとの指導を受け、修正のうえ各委員の確認を経て 12 月 28 日に委員長の裁可を得た。

ii) 韓国水力・原子力発電会社（KHNP）との共同研究について

KHNP からの提案により平成 30 年から実施可能性について検討してきた KHNP の持つ韓国人のデータと協会の持つデータを使ったモンゴリアンを対

象とした疫学調査について、韓国の個人情報保護法の改正に伴った KHNP が保有するデータの一旦削除、ならびに再度入手の手続きが必要となり、現状では実施可能性が困難なことから一時凍結とすることを報告した。

委員会からは承との判断と、引き続き新たな情報があれば提供することとの指導を受けた。

iii) ニュースレターについて

第VI期調査で調査協力を表明した約 8 万 2 千人のうち、死亡が確認されている人、並びに新たな住所が確認できなかった人を除いた 8 万 380 名に調査に協力いただけることになった人のプロフィールを取り纏めてニュースレターとして送付した。この対応状況について報告し、確認を受けた。

4. 2 放射線疫学調査 調査研究評価委員会

(1) 令和 2 年度第 1 回委員会 (令和 3 年 1 月 25 日開催) 議事

委員会では以下の事項について報告し、指導を受けた。

1) 審議事項

- i) 本調査における緊急作業者の取扱い方針の検討
- ii) 調査集団の設定方法と解析方針の検討

2) 報告事項

- iii) 第VI期報告書シンポジウム 2020 の結果報告
- iv) 第VI期調査で調査協力を同意された方へのお知らせ
- v) がん罹患情報 2016-2017 の利用申請
- vi) 2020 年度公表済論文・学会発表
- vii) 韓国水力原子力発電会社 (KHNP) との共同研究

議事)

i) 本調査における緊急作業者の取扱い方針の検討

緊急作業者の取扱いについて、今後も調査集団に含めて追跡を行い、緊急作業線量の評価方法について検討を進めること。

ii) 調査集団の設定方法と解析方針の検討

解析手法について「あり方検討会報告書」ではマッチングによる調整での解析を行うとなっているが、検討の結果主解析としてモデルによる調整での解析を行い、補助解析としてマッチングによる調整での解析を行うこととする。

第V期のデータでは生活習慣のデータに欠落が多く、マッチングでの解析を行うとの方向性になったが、その際のデータについても今回の検討内容を反映させるなど、引き続き補完を進めていただきたい。

iii) ~vii) については特に指摘事項等はなかった。

4. 3 放射線疫学調査 あり方検討会フォローアップ委員会

(1) 令和2年度第1回委員会（令和2年11月17日開催：メール審議）

委員会では以下の事項について報告し、指導を受けた。

報告事項

- i) 福島第一原子力発電所での緊急作業従事者の取り扱いについて
- ii) 調査集団の設定方法と解析方針の検討
- iii) 第VI期成果報告会（放射線影響協会シンポジウム2020）の開催について

i) ～iii) について特に指導事項はなかった。

(2) 令和2年度第2回委員会（令和3年2月5日開催）議事

委員会では以下の事項について報告し、指導を受けた。

1) 審議事項

- i) 本調査における緊急作業者の取扱い方針の検討
- ii) 調査集団の設定方法と解析方針の検討

2) 報告事項

- iii) 第VI期報告書シンポジウム2020の結果報告
- iv) 第VI期調査で調査協力に同意された方へのお知らせ
- v) がん罹患情報2016-2017の利用申請
- vi) 2020年度公表済論文・学会発表
- vii) 韓国水力原子力発電会社（KHNP）との共同研究

議事)

- i) 本調査における緊急作業者の取扱い方針の検討

緊急作業従事者を含めて今後も追跡を行い、分析を行うということに異論はなく、この方針をこの委員会の結論とする。

厚生労働省の委託で労働安全衛生総合研究所が行っている放射線業務従事者の健康影響に関する疫学研究（NEWS）と互いに情報交換していくこと。

緊急作業線量の臓器線量への換算にあたって、ヨウ素やセシウムなどの預託線量で評価された内部被ばく線量は、結果的に年度線量と同じと考えら、また、外部被ばく線量で想定するエネルギー分布や角度分布が変わったとしても、それほど大きな影響は与えないと考えられるが、何らかの検討は必要である。

- ii) 調査集団の設定方法と解析方針の検討

「調査集団の設定方法と解析方針の検討」ではモデルによる解析を主解析とし、マッチングは補助解析として行うことを委員会の結論とする。

今回のコホートはインフォームド・コンセントを行って同意を得た協力者で生活習慣アンケートもしっかりあるので、データの欠損が少ないというこ

とを丁寧に発信して誤解を招かないようにしていただきたい。
 iii) ~vii) については特に指摘事項等はなかった。

5. 本事業の理解促進活動

国際的な認知を得るため、本事業に伴う一連の調査を J-EPISODE (Japanese EPIdemiological Study On low-Dose radiation Effects) と命名し、その成果をホームページ上で周知するとともに、国内外の学術雑誌への投稿及び国際会議等で発表を行った。

5. 1 ホームページによる放射線疫学調査関連情報の周知

本年度は以下の更新を行った。

更新日	更新内容
2020年4月1日	Health Physics への論文掲載の告知。
4月7日	保健物理への論文掲載の告知。
5月12日	Radiation Protection and Dosimetry への論文掲載の告知。
6月23日	調査に参加する皆様の全国がん登録情報の利用の更新。
9月2日	第VI期報告書の掲載。 同意確認調査終了の告知。
10月22日	Radiation Protection Dosimetry への論文掲載の告知。 日本放射線影響学会第63回大会、日本保健物理学会第53回研究発表会、第93回日本産業衛生学会の発表要旨の掲載。
11月25日	放影協シンポジウム2020開催の告知。
2021年1月8日	新型コロナウイルスによる緊急事態宣言発令期間中の業務の掲載。
1月26日	健康影響評価計画書の更新。

5. 2 国内外の論文投稿・学会発表

国内外の機関に積極的に引用される調査として専門家に認知されることを目的に、喫煙・食事等の生活習慣調査に基づいた交絡の解析（発表①、④、⑤、⑥及び論文②、⑥）、第VI期調査における新規コホート設定の概要紹介（発表⑨）、記録線量から臓器線量への変換に関する検討（発表⑦、⑧及び論文③、④）、全国がん登録情報の利用の概要（発表⑩）、低線量率に焦点をあてた米国放射線業務従事者疫学調査の公開データの再解析（発表③及び論文（共同研究）①）及び放射線疫学調査の専門機関として他機関からの要請による国内外の放射線疫学調査の解説を行うなど（発表②及び論文⑤）、計10回の学会発表と7編の論文投稿を行った（論文①、②、③、④、⑤は掲載済み。⑥、⑦は投稿中）。

このうち、第V期調査までに明らかになった種々の交絡を調整した解析については、現在実施中の第VI期調査において全調査対象者に対する生活習慣調査を行っており、今後も重点的に調査・発表を行う。また、記録線量から臓器線量換算係数の推計方法の検討や、それに基づく臓器線量を用いた第V期調査リスク推計の再解析への換算を今後進めていき、これら推計方法と換算結果の発表を行う。

(1) 学会発表

【巻末参考資料 40～49頁 参照】

- ① 放射線業務従事者における放射線と喫煙との交絡に関する時系列検討. 第93回日本産業衛生学会（Web開催）. 2020.5.13 ポスター発表
- ② 成人の白血病を対象とした各国の放射線疫学コホート研究の概要. 日本保健物理学会 第53回研究発表会（Web開催）. 2020.6.29（日本エヌ・ユー・エスとの共同発表） ポスター発表
- ③ 原子力作業員の循環器系疾患死亡率の線量率効果：ハンフォードデータの再解析. 日本保健物理学会 第53回研究発表会（Web開催）. 2020.6.29（電力中央研究所との共同発表）ポスター発表
- ④ 放射線業務従事者における放射線と喫煙、飲酒との関連：最新の生活習慣等アンケート調査結果. 日本保健物理学会 第53回研究発表会（Web開催）. 2020.6.29 ポスター発表
- ⑤ 原子力施設従事者の雇用機関、職種、時期別被ばく線量の状況：J-EPISODE 新コホート. 日本保健物理学会 第53回研究発表会（Web開催）. 2020.6.29 ポスター発表
- ⑥ 日本の放射線業務従事者における放射線による健康影響への喫煙交絡：これまでのがん死亡解析結果と今後の展望：Confounding of smoke to radiation health effects among Japanese nuclear workers：The previous results of cancer mortality analysis and future forecast. 日本放射線影響学会 第63回大会（Web開催）. 2020.10.15 ポスター発表
- ⑦ 放射線業務従事者コホート J-EPISODE（追跡期間 1991-2010）の臓器吸収線量

を用いた再解析：Reanalysis of the nuclear worker cohort J-EPISODE with follow-up period 1991-2010 using organ-absorbed dose. 日本放射線影響学会 第 63 回大会 (Web 開催) . 2020.10.15 ポスター発表

- ⑧ Reanalysis of Cancer Mortality Risk in Association with Organ Absorbed Dose for Japanese Nuclear Workers 1991-2010. IRPA 15 (ソウル、Web 開催) . 2021.1.18 口頭発表
- ⑨ Cohort profile of the Japanese epidemiological study on low-dose radiation effects (J-EPISODE). IRPA 15 (ソウル、Web 開催) . 2021.1.18 ポスター発表
- ⑩ 全国がん登録情報 2016 年分と J-EPISODE 原子力施設作業員コホートとのリンケージ. 日本疫学会 第 31 回学術総会 (Web 開催) . 2021.1.27 口頭発表

(2) 論文

【巻末参考資料 50～101 頁 参照】

- ① Effect of Radiation Dose Rate on Circulatory Disease Mortality among Nuclear Workers: Reanalysis of Hanford Data. Health Phys. 119(3), 280-288, 2020. (電力中央研究所との共同執筆)
- ② Direct Risk Comparison between Radiation and Smoking on Cancer Mortality among Nuclear Workers in Japan (J-EPISODE). Jpn. J. Health Phys. 55, 32-39, 2020.
- ③ Conversion Factor from Dosimeter Reading to Air Kerma for Nuclear Worker using Anthropomorphic Phantom for Further Conversion from Air Kerma to Organ-Absorbed Dose. Radiat Prot Dosimetry. 189(3), 371-383, 2020.
- ④ Estimation of Photon Energy and Direction Distributions at Japanese Nuclear Power Plants Based on Literature Survey for J-EPISODE Study. Radiat Prot Dosimetry. 190(4), 372-391, 2020.
- ⑤ 白血病を対象とした各国の放射線業務従事者および原爆被爆者の疫学研究の概要. Jpn. J. Health Phys. 55, 215-225, 2020. (日本 NUS との共同執筆)
- ⑥ A Comprehensive Risk Comparison Between Lifestyle, Socio-Economic Status, and Radiation by Multiple Imputation and Poisson Regression: A Cohort Study of Cancer Mortality in a Japanese Epidemiological Study on Low-Dose Radiation Effects (J-EPISODE). Health Phys. (投稿中)
- ⑦ Summary of Radiation Epidemiological studies in Japan. J. Radiat. Prot. Res. (日韓豪共同学術雑誌：Journal of Radiation Protection and Research からの依頼執筆、投稿中)

5. 3 ニュースレター

【巻末参考資料 102～103 頁 参照】

2015 年度から開始した新たな疫学調査計画に基づく調査協力者へのインフォームド・

コンセントにより、約 8 万 2 千人の方から調査協力の同意を得た。

このインフォームド・コンセントの際に、事業の進捗状況について適宜お知らせすると説明していたことから、第Ⅵ期調査（2015 年度～2019 年度）に行った調査協力依頼と、生活習慣調査の結果を取り纏めて、2020 年度に「ニュースレター」（見開き 6 面）として調査にご協力いただける方に送付した。

送付人数は第Ⅵ期の 5 年間の間に亡くなられた方、新たな住所が確認できなかった方（福島で長期に亘り避難していることにより、住所不明になった方など）を除いた 8 万 380 名であった。

ニュースレターを受け取った人からは住所変更の申し出（69 件）、現在の健康状態の申告等（43 件）、調査協力の撤回などの申し出（22 件）などがフリーダイヤル、または E メールに寄せられた。

同意撤回の申出を行った人には直筆での「同意書」を頂いていることから、同意撤回が本人からの申し出であることを確認するため、「同意撤回書」を送付し、直筆で氏名等を記入していただくとともに、公的身分証明書（自動車運転免許証（返納した場合は運転経歴証明書）、旅券（パスポート）、写真付住民基本台帳カード）の写しを添付して返送していただき、同意書に記入された氏名との筆跡との照合等を行い、対象者リストから削除した。

5. 4 第Ⅵ期調査シンポジウム

【巻末参考資料 104 頁 参照】

令和 2 年（2020）12 月 11 日に、放射線影響協会シンポジウム 2020 「低線量放射線による人体への影響に関する疫学的調査（第Ⅵ期調査）成果報告会」を開催した。本報告会は新型コロナウイルスの影響により、Web 形式での開催となり、事前登録者数 120 名、当日参加者数 105 名（参加率 87.5%）、質問者数 11 名、質問数 42 件であった。

開会

シンポジウム冒頭、放影協理事長の佐々木康人より開会の挨拶があり、引き続き原子力規制委員会・原子力規制庁 放射線防護企画課の田中桜企画官より、1990 年から今まで続く本疫学調査への期待、今回のシンポジウムの位置付け、そして参加者からの忌憚のないご意見を求めるとの挨拶があった。

報告講演

第Ⅵ期調査の報告講演として、協会から三つの発表を行った。

一つ目の発表は当センターの三枝から「第Ⅵ期調査の概要」と題して、第Ⅵ期調査において 30 年ぶりに定められた新たなコホートの設定方法とその特徴について報告を行った。引き続き工藤より「新コホートの特性 — 交絡の観点から —」と題して、新たなコホートを用いた交絡因子分析の結果についての報告と、疫学調査に伴う様々な誤差の除外についての解説を行った。最後に古田より「J-EPISODE における臓器吸収線量再構

築」と題して、第VI期調査期間において算出された臓器吸収線量の位置付けと算出方法、本調査における今後の利用についての報告を行った。

招待講演

報告講演に引き続き、当協会の放射線疫学調査あり方検討会フォローアップ委員会委員長である吉村健清・産業医科大学名誉教授および放射線疫学調査研究評価委員会委員長である祖父江友孝・大阪大学大学院 医学研究系研究科 環境医学 教授による招待講演が行われました。

吉村氏からは「放射線業務従事者疫学調査の生活習慣調査の意義」と題して、様々な事例に基づいて疫学調査のあり方とその意義についての解説があり、さらに観察期間が長期でかつ生活習慣調査が行われている本疫学調査の重要性についての説明があった。また、祖父江氏からは「がん登録データの利活用」というタイトルで、J-EPISODEが2019年から利用を始めたがん罹患データの提供を受けている全国がん登録制度の仕組み、その有利性などについて、前身の地域がん登録からの設立の経緯を含めて紹介があった。

閉会

全講演終了後、当協会の猪飼・常務理事よりまとめの挨拶と参加者への感謝が述べられた。

令和 2 年度原子力施設等防災対策等委託費
(低線量放射線による人体への影響に関する疫学的調査)
事業

(原子力規制委員会原子力規制庁委託調査報告書)

(巻末参考資料)

(原子力規制委員会原子力規制庁委託調査報告書)
令和2年度原子力施設等防災対策等委託費
(低線量放射線による人体への影響に関する疫学的調査)事業

(巻末参考資料)

目 次

1. 調査活動	27
1. 1 住民票の写し等の交付請求及び交付の状況(都道府県別)	27
1. 2 生死追跡状況の詳細	28
2. がん罹患情報の取得	30
2. 1 リンケージ(照合)の方法	30
2. 2 リンケージ(照合)の結果	30
3. 疫学調査事業の課題と解析方針の検討	31
3. 1 調査における緊急作業者の取扱い方針の検討	31
3. 2 調査集団の設定方法と解析方法の検討	36
4. 国内外への情報発信	40
4. 1 学会発表	40
4. 2 論文発表	50
4. 3 ニュースレター	102
4. 4 第VI期調査シンポジウム	104

1. 調査活動

表 1. 1 住民票の写し等の交付請求及び交付の状況（都道府県別）（本文 6 頁参照）

都道府県名	請求		回答				取得率(%) (b.+c.+d.)/a.	
	市区町村数	a.件数	b.住民票写し	c.転出 (転出)	d.死亡 (死亡)	e.該当者なし		f.不交付
北海道	63	660	592	46	21	1	0	99.8
青森	26	431	376	50	5	0	0	100.0
岩手	16	58	54	4	0	0	0	100.0
宮城	32	648	589	39	19	1	0	99.8
秋田	17	83	78	2	3	0	0	100.0
山形	15	38	36	1	1	0	0	100.0
福島	45	2,005	1,864	105	35	1	0	100.0
茨城	40	3,005	2,826	82	96	1	0	100.0
栃木	19	100	88	9	3	0	0	100.0
群馬	17	102	94	6	2	0	0	100.0
埼玉	62	501	464	26	11	0	0	100.0
千葉	50	750	696	35	18	1	0	99.9
東京	52	1,612	1,467	108	36	1	0	99.9
神奈川	54	2,811	2,605	108	98	0	0	100.0
新潟	33	1,258	1,179	46	32	1	0	99.9
富山	14	206	198	4	4	0	0	100.0
石川	16	269	242	15	12	0	0	100.0
福井	17	1,866	1,732	92	42	0	0	100.0
山梨	15	41	37	3	1	0	0	100.0
長野	33	121	113	5	3	0	0	100.0
岐阜	27	140	135	3	2	0	0	100.0
静岡	41	1,364	1,264	66	34	0	0	100.0
愛知	64	829	756	49	24	0	0	100.0
三重	22	269	250	8	11	0	0	100.0
滋賀	14	165	158	4	3	0	0	100.0
京都府	31	604	562	13	29	0	0	100.0
大阪府	71	1,344	1,237	53	54	0	0	100.0
兵庫	45	2,385	2,218	78	89	0	0	100.0
奈良	24	158	149	4	5	0	0	100.0
和歌山	12	84	79	2	3	0	0	100.0
鳥取	15	133	127	1	5	0	0	100.0
島根	13	502	470	18	14	0	0	100.0
岡山	25	365	337	11	17	0	0	100.0
広島	27	772	731	10	31	0	0	100.0
山口	18	370	342	5	22	1	0	99.7
徳島	16	55	50	4	1	0	0	100.0
香川	16	244	228	12	4	0	0	100.0
愛媛	19	657	622	23	12	0	0	100.0
高知	17	63	59	3	1	0	0	100.0
福岡	66	1,207	1,092	67	48	0	0	100.0
佐賀	19	539	495	29	15	0	0	100.0
長崎	18	353	327	14	12	0	0	100.0
熊本	31	139	127	7	5	0	0	100.0
大分	15	137	124	10	3	0	0	100.0
宮崎	15	94	86	1	7	0	0	100.0
鹿児島	27	349	323	15	10	1	0	99.7
沖縄	23	94	86	5	3	0	0	100.0
合計	1,367	29,980	27,764	1,301	906	9	0	99.97

表 1. 2 生死追跡状況の詳細

(令和 3 年 3 月現在)

群 ^{注-1}	登録時期 ^{注-2}	生死追跡調査の 開始時期	人数 (男 女)	生死追跡状況の内訳		
				追跡結果	人数 (男 女)	
A-1	昭和 63 年度以前	平成 3 年度以降	114,900 (114,898 2)	生存	36,308 (36,307 1)	
				死亡	24,622 (24,622 0)	
				脱落	53,970 (53,969 1)	
				住所情報無し	0 (0 0)	
A-2	昭和 63 年度以前	平成 7 年度以降	62,609 (62,608 1)	生存	3,305 (3,304 1)	
				死亡	2,628 (2,628 0)	
				脱落	27,676 (27,676 0)	
				住所情報無し	29,000 (29,000 0)	
B	昭和 63 年度以前	平成 8 年度以降	4,074 (4,074 0)	生存	1,166 (1,166 0)	
				死亡	348 (348 0)	
				脱落	1,955 (1,955 0)	
				住所情報無し	605 (605 0)	
E	昭和 63 年度以前	平成 8 年度以降	4,296 (2,779 1,517)	生存	734 (576 158)	
				死亡	339 (269 70)	
				脱落	1,641 (1,082 559)	
				住所情報無し	1,582 (852 730)	
C	平成 1~6 年度	平成 8 年度以降	57,861 (57,345 516)	生存	14,981 (14,814 167)	
				死亡	5,278 (5,266 12)	
				脱落	33,394 (33,139 255)	
				住所情報無し	4,208 (4,126 82)	
D	平成 7~10 年度 (燃料加工事業者の みの従事者及び女 子)	平成 11 年度以降	33,388 (32,855 533)	生存	9,104 (8,933 171)	
				死亡	1,800 (1,790 10)	
				脱落	21,633 (21,320 313)	
				住所情報無し	851 (812 39)	
F	平成 11 年度以降 (意思確認調査にお ける新規調査対象 者)	平成 30 年度以降	14,853 (14,507 346)	生存	14,457 (14,118 339)	
				死亡	33 (33 0)	
				脱落	363 (356 7)	
				住所情報無し	0 (0 0)	
合計			291,981 (289,066 2,915)	生存	80,055 (79,218 837)	
				死亡	35,048 (34,956 92)	
				脱落	140,632 (139,497 1,135)	
				(脱落の内訳)		
				初回追跡時脱落 ^{注-3}	24,655 (24,365 290)	
				住所不明等 ^{注-4}	9,987 (9,941 46)	
				不同意 ^{注-5}	12,480 (12,292 188)	
				郵便不達 ^{注-6}	732 (732 0)	
				IC 不同意 ^{注-7}	13,122 (13,006 116)	
				IC 郵便不達 ^{注-8}	1,185 (1,164 21)	
				IC 未回答等 ^{注-9}	77,803 (77,332 471)	
				不交付 ^{注-10}	668 (665 3)	
住所情報無し ^{注-11}	36,246 (35,395 851)					

注-1 第 I 期放射線疫学調査解析対象: A-1
 第 II 期放射線疫学調査解析対象: A-1、A-2、B、E 及び C
 第 III 期、第 IV 期及び第 V 期放射線疫学調査解析対象: A-1、A-2、B、E、C 及び D
 第 VI 期及び第 VII 期放射線疫学調査解析対象: A-1、A-2、B、E、C、D 及び F

注-2 放射線業務従事者として登録された時期

注-3 原子力事業者等から入手した住所情報に基づいて初めて行う住民票の写し等の請求において、該当者なし、除票の保存期間経過、職権消

除等の理由で、住民票の写し等を取得できずに脱落した調査対象者の数

注・4 一旦、住民票の写し等を取得した後の再調査において、該当者なし、除票の保存期間経過、職権消除、海外転出等の理由により脱落した調査対象者の数

注・5 第2次交絡因子調査又は「説明と同意の確認」調査において、調査対象者となることに同意しない旨の回答をした者の数

注・6 「説明と同意の確認」調査において、郵送した説明資料が不達となり最終的な意思の確認がなされなかった者の数

注・7 「意思確認調査」において不同意の意思を表明した者の数

注・8 「意思確認調査」において、郵送した説明資料が不達となり最終的な意思の確認がなされなかった者の数

注・9 「意思確認調査」において回答がなかった者、回答に不備等があり最終的な意思の確認がなされなかった者等の数

注・10 市区町村の協力を得られなかったこと等により、住民票の写し等を取得できなかった調査対象者の数

注・11 原子力事業者から住所情報を入手できなかったため、当初から住民票の写し等の取得による生死追跡調査の対象とならなかった者の数

(本文 8 頁参照)

2. がん罹患情報の取得

2. 1 リンケージ（照合）の方法

照合作業はNCCで行われる

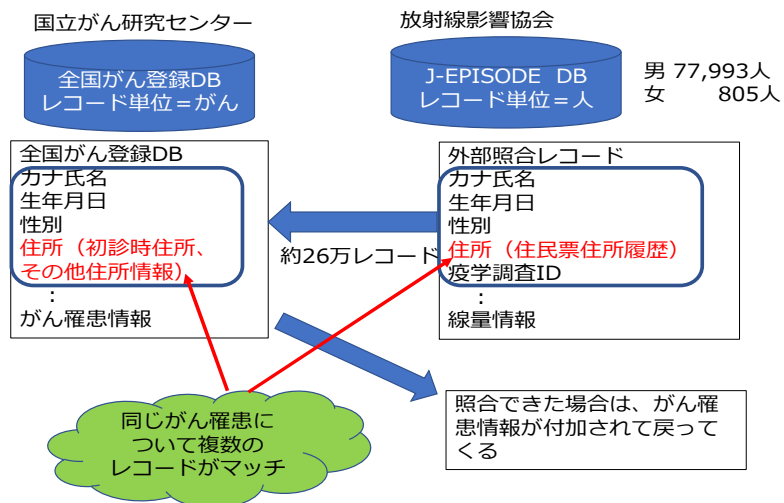
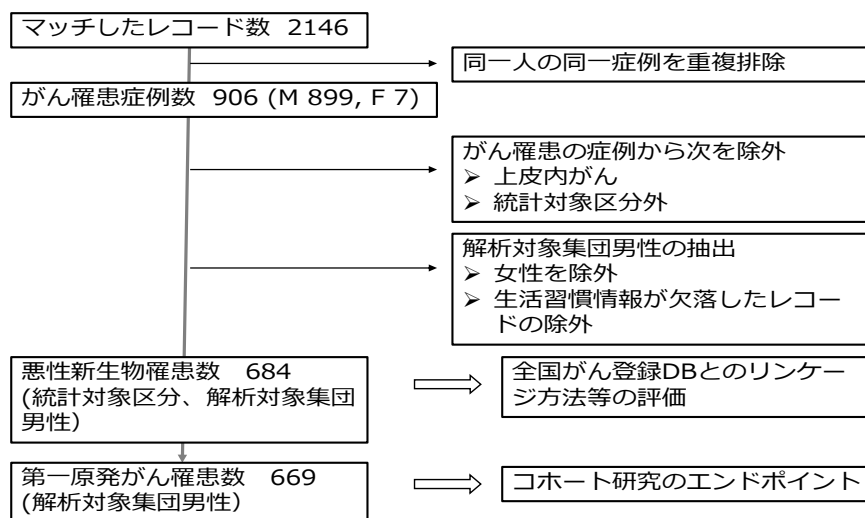


図 2. 1 全国がん登録 DB のレコードと J-EPISODE DB のレコードのリンケージ

2. 2 リンケージ（照合）の結果

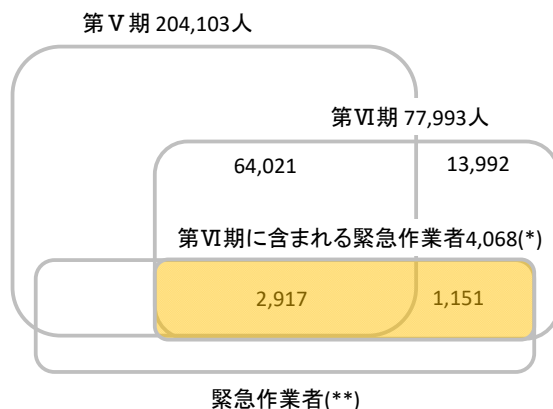
照合結果(2016年)



(注) 上記の数値は、全国がん登録法に基づき非匿名化情報の提供を受け、独自に作成・加工したものである。

図 2. 2 リンケージの結果 (2016年)

3. 疫学調査事業の課題と解析方針の検討
 3. 1 調査における緊急作業者の取扱い方針の検討



(*)ここでは、福島第一原発構内で2010-2015年度緊急作業線量記録がある者と定義した。
 なお、2010-2011年度線量>0の者は3681人。
 (**)厚生労働省が把握している緊急作業員は約2万人。

図3.1 J-EPISODEに含まれる緊急作業員

《 参考 》 緊急時の線量限度とその適用

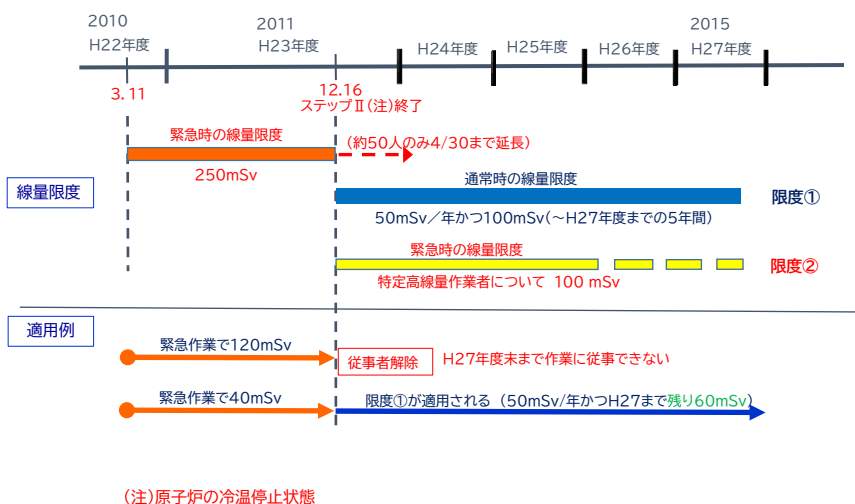


図3.2 緊急時の線量限度とその適用

表 3. 1 緊急作業者を第Ⅵ期コホートから除外した場合の累積線量分布への影響

- 仮に、緊急作業者を第Ⅵ期コホートから除外すると、コホートサイズが77,993人から73,925人へと5.2%減少するので、解析に必要な人年の蓄積に要する期間が長くなる。
- コホート全体の累積線量分布に比べると、緊急作業者は高線量の者が多いので、緊急作業者を除外すると、高線量群のウェイトが相対的に小さくなる。

2018年度末累積線量分布								
	人数	0 mSv	<5	5-	10-	20-	50-	100+
第Ⅵ期コホート	77993	28.8%	34.5	8.6	9.0	10.2	5.3	3.6
緊急作業者を除外	73925	30.2%	35.3	8.5	8.7	9.4	4.7	3.1

表 3. 2 緊急作業者を第Ⅴ期コホートから除外した場合のリスク係数への影響（試算）

- 試算として、第Ⅴ期の観察期間を1991-2012年とした追加解析(204,104人)から、緊急作業該当者を除外した集団(198,552人)について同様にリスク分析を行うと、全がん死亡(白血病を除く)のERR/Svは1.31から1.57へと20%増加し、リスク係数への影響が大きい。

対象	観察期間	死亡	ラグ	ERR/Sv、 90%CI
第Ⅴ期コホート N=204,104	1991-2012年	8757	10年	1.37 (0.64, 2.10)
緊急作業者を除外 N=198,552	1991-2012年	8757	10年	1.57 (0.83, 2.31)

表 3. 3 緊急作業線量を通常作業線量に加算した場合の影響分析（簡便化のための仮定）

<ul style="list-style-type: none"> ● 第Ⅵ期対象者77,993人に関する、2010-2015年度の緊急作業線量のうち外部線量を、通常作業線量(外部線量)に加算した。
<ul style="list-style-type: none"> ● 福島第一原発構内の2010-2011年度は内部被ばくを含むので、公文データから集計した内部線量割合を利用して、個人別緊急作業線量を外部・内部線量に分割推計した。
<ul style="list-style-type: none"> ● 福島第一原発構外は外部線量のみと仮定した。

- ・ 中登への定期線量報告では、実効線量(外部・内部線量の合算)のみが報告されている。
- ・ 一方、東電公表資料からは、内部被ばくは2010-2011年度にみられることが確認できた。

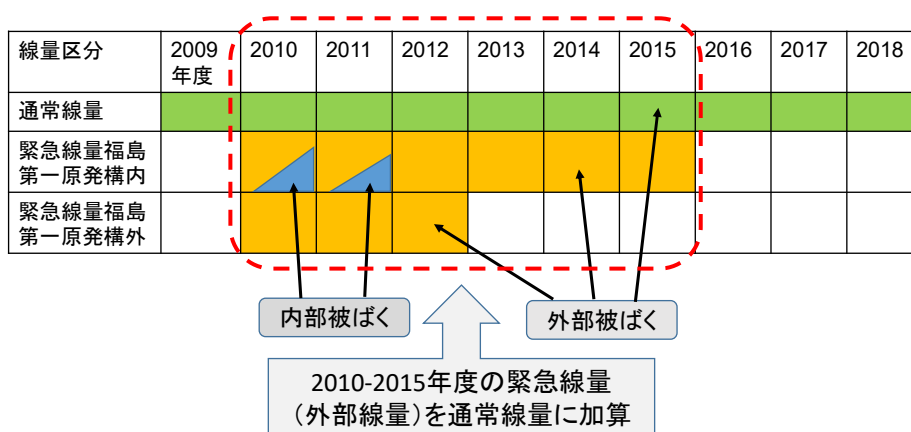


図 3. 3 緊急作業線量の外部・内部線量の概念図

- 第Ⅵ期解析対象者77,993人の累積線量分布を、(A)通常作業線量のみと、(B)通常作業線量+緊急作業線量(外部線量)で比較した。
- 累積線量分布の違いはほとんど見られない。

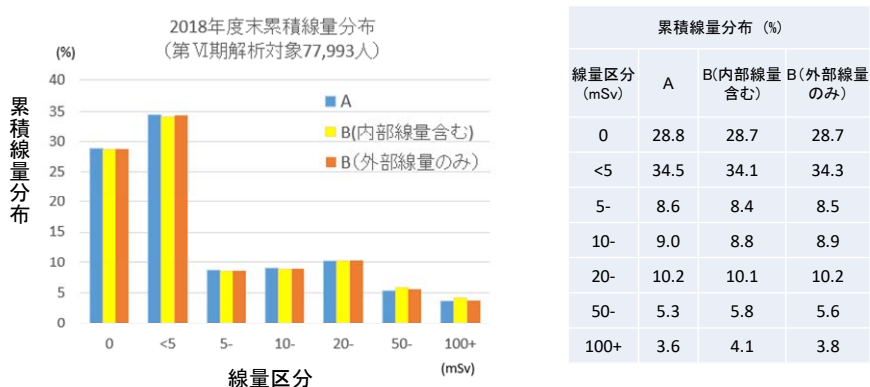


図 3. 4 緊急作業線量を通常作業線量に加えた場合の 2018 年度末累積線量分布

- 第Ⅵ期解析対象者77,993人の通常作業線量(1957-2018年度)と緊急作業線量(2010-2015年度)を集団線量(人・Sv)で見ると、総被ばく線量に占める緊急作業線量の割合は6.4%であった。

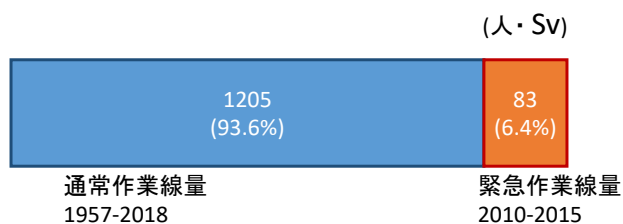


図 3. 5 緊急作業線量を通常作業線量の集団線量の比較

表 3.4 緊急作業線量を通常作業線量に加えた場合のリスク係数への影響（試算）

- 全がん死亡（白血病を除く）
- N=204,103人（観察期間1991-2010年）
N=204,104人（同1991-2012年）

線量	観察期間	死亡	ラグ	ERR/Sv、90%CI
通常作業線量	1991年から 2010年まで	7929	10年	1.20 (0.43, 1.96)
	2010年まで	7929	0年	0.80 (0.15, 1.46)
	2012年まで	8757	0年	(A) 0.96 (0.34, 1.58)
通常作業線量＋ 緊急作業線量(*)	2012年まで	8757	0年	(B) 0.95 (0.33, 1.58)
(*)緊急作業線量は内部被ばく線量を含む				

- 緊急作業線量（内部被ばくを含む）を通常作業線量に加えても、リスク係数への影響はほとんどみられない。

（参考）累積線量のラグ

放射線の影響ががん死亡として観察されるまでには、潜伏期間がある。そのため、固形がんのリスク解析では一般に被ばくから死亡までに10年の時間差（ラグ）があると仮定し、ある年までの死亡リスクを評価する際には、遡った10年前までの累積線量を用いて解析を行う。

なお、表3.4において緊急作業線量を加えた場合と除いた場合のリスク係数を比較した試算では、累積線量にラグ10年を設定すると、緊急作業線量が2012年までの観察期間を外れることから、(A)および(B)ではラグ0年に設定した。

3. 2 調査集団の設定方法と解析方法の検討

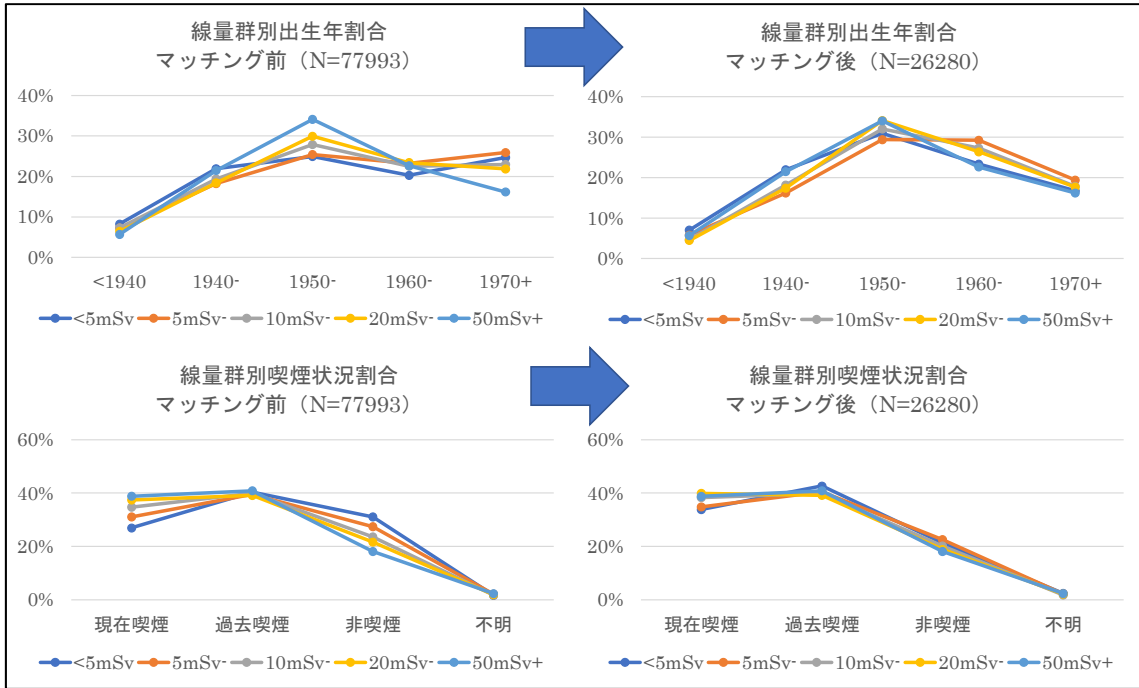


図 3. 6 マッチング前後の線量群別出生年割合、喫煙割合

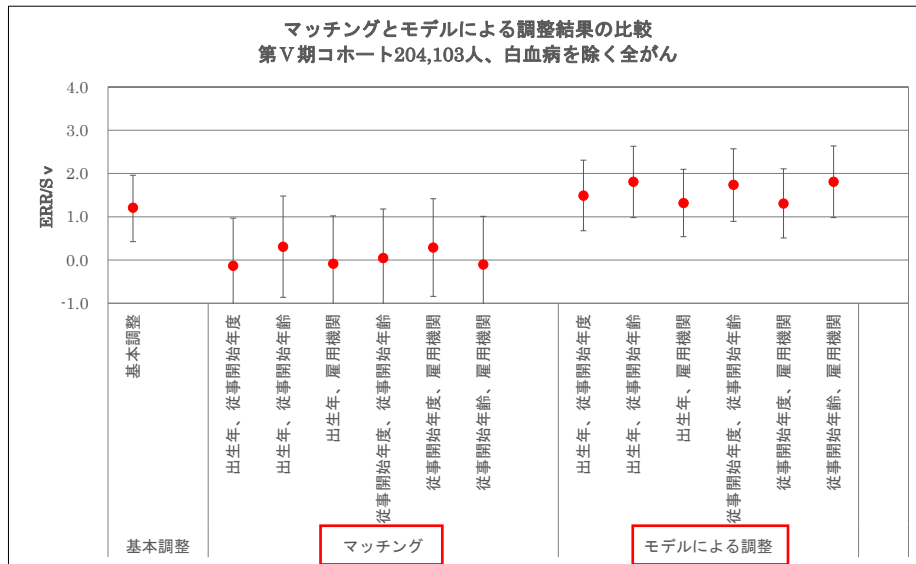


図 3. 7 マッチングとモデルによる調整との ERR/Sv の比較

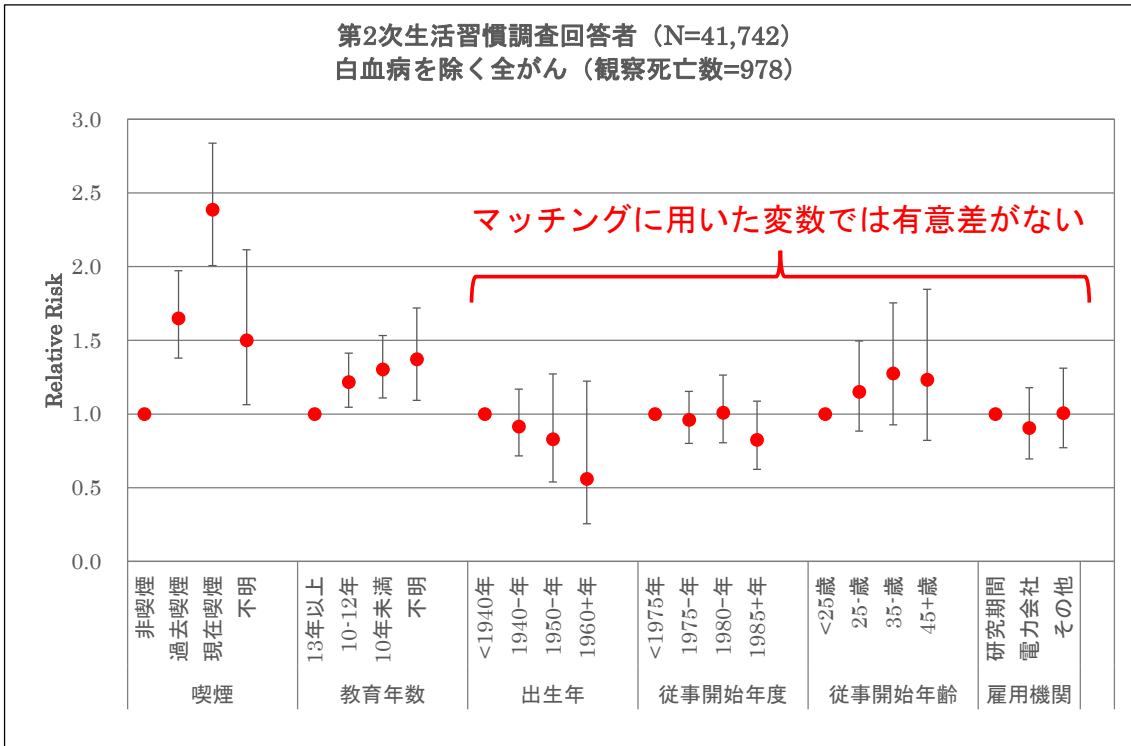


図3.8 変数、項目ごとの白血病を除く全がん死亡率

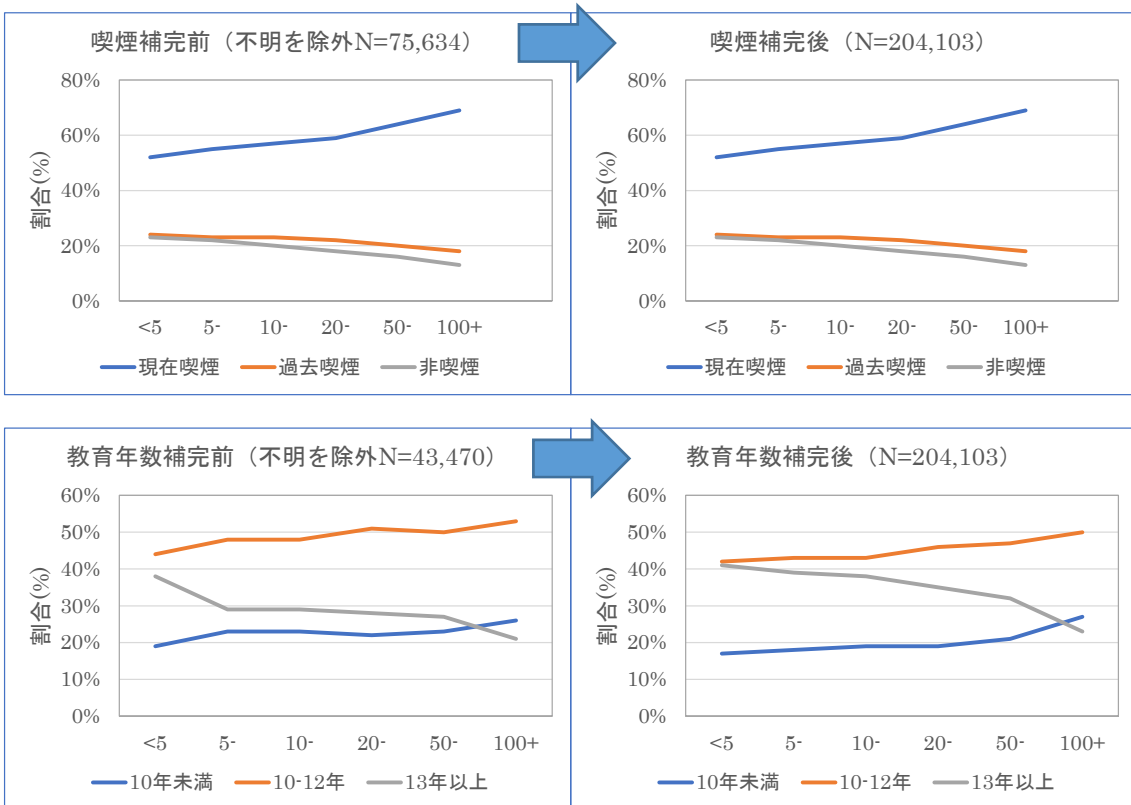


図3.9 補完前後の喫煙、教育年数の分布割合

表 3.5 第V期コホート 204,103 人における白血病を除く全がんの ERR/Sv

調整項目	ERR/Sv (90%信頼区間)	減少割合
年齢、暦年、地域	1.13 (0.37, 1.89)	—
+喫煙	0.69 (-0.04, 1.41)	39%
+教育年数	0.94 (0.19, 1.70)	17%
+喫煙、教育年数	0.57 (-0.15, 1.30)	50%

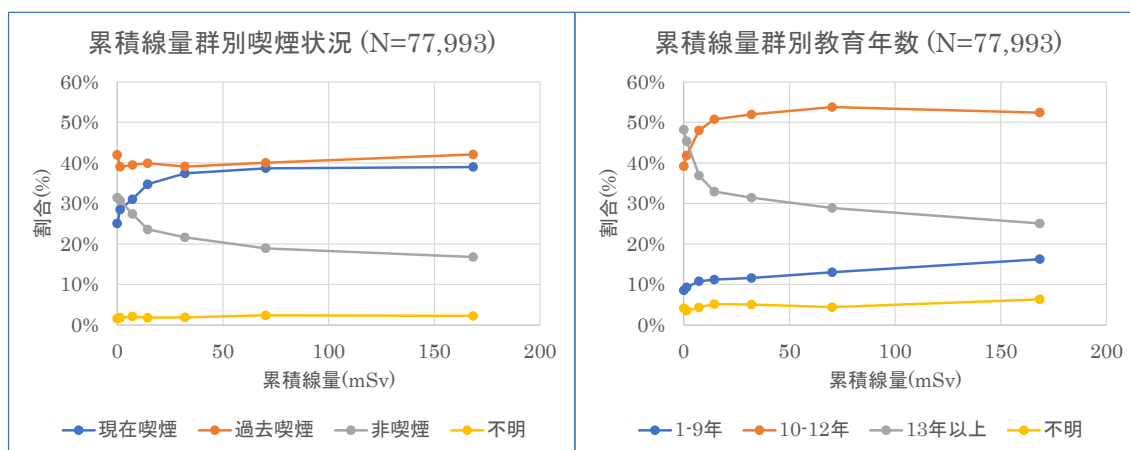


図 3.10 新コホートにおける喫煙、教育年数の状況

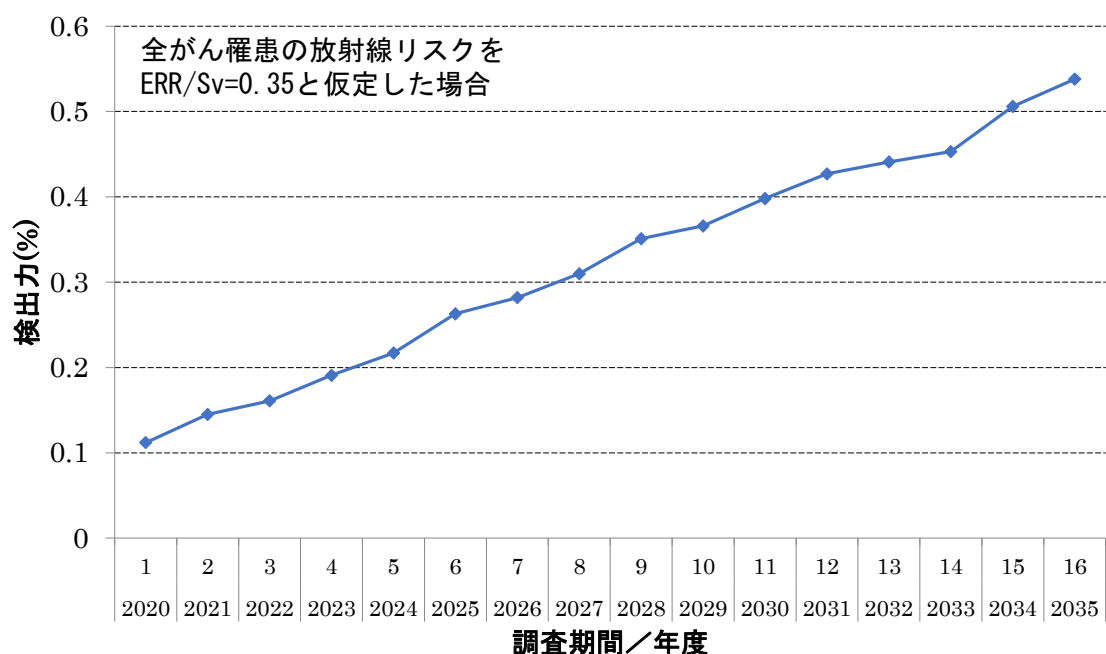


図 3.11 新コホートにおける全がん罹患の検出力 (全がん罹患の放射線リスクを ERR/Sv=0.35 と仮定)

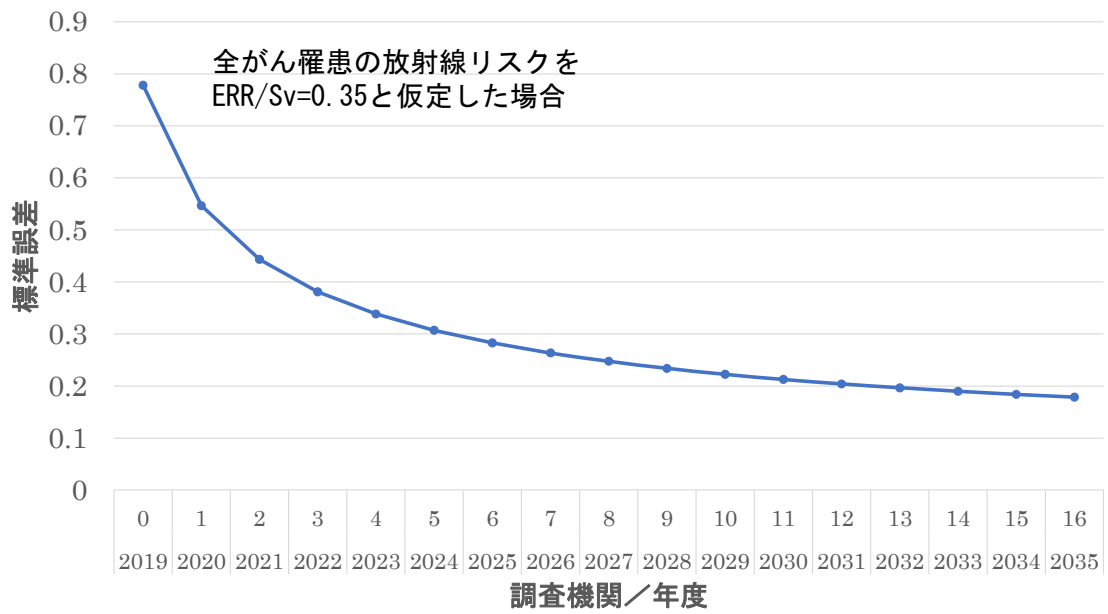


図 3. 1 2 新コホートにおける全がん罹患の標準誤差
(全がん罹患の放射線リスクを ERR/Sv=0.35 と仮定)

4. 国内外への情報発信

4. 1 学会発表

(1) 第 93 回日本産業衛生学会、Web 開催 2020.5.13

O14-1

放射線業務従事者における放射線と喫煙との交絡に関する時系列検討

工藤 伸一、西出 朱美、吉本 恵子、古田 裕繁、
三枝 新

公益財団法人放射線影響協会 放射線疫学調査センター

【背景・目的】放射線影響協会では、放射線業務従事者を対象としたコホート調査 (Japanese Epidemiological Study on Low-Dose Radiation Effects: J-EPISODE) を行っている。1997 年から 1999 年にかけて部分集団を対象に実施した生活習慣等アンケート調査の結果において、放射線の累積線量と喫煙との正の相関、即ち累積線量の高い群ほど現在喫煙割合が高いという交絡がみられた。2003 年から 2004 年にかけて実施した 2 回目のアンケート調査では、高齢者を選択的に対象者としたこと、及び日本人全体の喫煙割合の低下を反映し、平均喫煙割合は低下したが、累積線量と喫煙との相関は依然残っていた。この結果、放射線リスク推定値を算出する際に喫煙を調整した場合、推定値が大幅に (死因によっては半分以下に) 減少する結果となった。放射線影響協会では 2015 年より、調査対象者となることに同意した者全員を対象に 3 回目の生活習慣等アンケート調査を実施してきた。本発表ではこの結果に基づき、累積線量と喫煙との交絡について、これまでの調査結果との比較を交えて報告する。

【方法】アンケート票は自記式とした。1999 年 3 月末までに放射線業務に従事した経験を有する者のうち、2015 年 3 月末時点で生存している者については住所を把握していたため、郵送により調査票を配布した。また原子力発電施設等への調査票の直接配布も行った。いずれの場合も Opt-in による同意を取得した者にアンケートの回答を依頼した。累積線量と喫煙との相関については、年齢調整済 Cochran Mantel Haenszel 統計量により有意性を判断した。年齢は 2019 年 3 月 31 日時点、累積線量は 2019 年 3 月 31 日までの合計値を用いた。

【結果】2015 年から 2019 年 10 月までの間に約 8 万人の同意者からアンケート調査の回答が得られた。現在喫煙割合を時系列にみた場合、第 1 回調査では 67%、第 2 回調査では 47%、そして今回実施した第 3 回では 30%であった。第 3 回調査でも第 1 回、第 2 回と同様、年齢調整済 Cochran Mantel Haenszel 統計量により、累積線量と喫煙状況の間に有意な正の相関がみられた。このことは集団全体の喫煙割合が下がったとしても、累積線量と健康リスクとの関係に喫煙の交絡が依然残っていることを示し、放射線リスクの検討に当たっては喫煙を調整することが必要であることを示唆している。

※ 本調査は原子力規制委員会原子力規制庁の委託業務として実施した。

成人の白血病を対象とした各国の放射線疫学コホート研究の概要

Outline of the radiation epidemiological cohort study for leukemia among nuclear workers in each country

○賞雅 朝子¹、當麻 秀樹¹、工藤 伸一² (¹日本エヌ・ユー・エス株式会社、²(公財)放射線影響協会)

○A. Takamasa¹, H. Toma¹, S. Kudo² (¹JANUS, ²REA)

1. はじめに

広島、長崎の原爆被爆者調査 (LSS) では、放射線による白血病死亡リスクが報告された。LSS の研究は高線量・高線量率の放射線被ばくが対象であるため、低線量・低線量率の放射線被ばくの影響を解明するために原子力関連従事者など多くの放射線疫学調査が実施されている。しかし、低線量・低線量率放射線被ばくと白血病死亡リスクに関する研究結果はさまざまである。この原因として白血病が稀な疾患であることに起因する検出力の不足や、白血病のベースライン罹患率やコホートの組成、解析手法が異なることなどの可能性が考えられる。本発表では白血病のサブタイプ、ベースライン罹患率等を取りまとめた上で、これまでに実施された白血病リスクに関する主要な放射線疫学調査論文について解析手法、結果等を概括することを目的とした。

2. 白血病の概要

白血病は大まかにリンパ性と骨髄性に分類でき、さらに病気の進行パターンや症状から慢性と急性の 4 つのサブタイプに分類することができる。また日本を含む一部の地域ではウィルス性の成人 T 細胞白血病が存在する。

白血病のベースライン罹患率を国別・サブタイプ別に比較した場合 (成人男性のみ)、日本・中国・韓国の白血病全体の罹患率は欧米諸国よりも 4 割程度低い。また、日本・中国・韓国における CLL の罹患率も欧米諸国と比べて小さいという特徴がある。一方日本では白血病全体のうち AML の占める割合が大きいという特徴がある。

3. 研究毎の解析手法、結果

研究毎の解析手法は調整変数に幾分の違いがあったものの、潜伏期間やモデルはほぼ等しいものであった。CLL を除く白血病のリスクが有意であったのは LSS、INWORKS、NRRW の研究であり、LSS の研究では AML、ALL、CML で有意なリスクが報告された。LSS については高線量 (平均 200 mGy) の急性被ばくによる可能性が考えられた。INWORKS および NRRW の研究では、CML のみの ERR/Sv が高く、これらは軍需産業従事者を含んでおり、プルトニウムによる内部被ばくの影響の可能性が考えられた。また CML のベースライン罹患率は日本および欧米諸国でも低く、CML の死亡者数がほかのサブタイプより少なくともより高い ERR/Sv となる可能性が考えられた。

また LSS と J-EPIISODE では同じ日本人のコホートにもかかわらず結果が異なっており、平均被ばく線量の違いや、急性・慢性の被ばく形態の違い、などの可能性の影響が考えられた。

白血病は稀な疾患であり、十分な統計的検出力を得るためには、将来にわたるデータの継続的な蓄積が必要である。また医療技術などの発展に伴い白血病死亡率は年々減少しつつあるため、死亡に代わるエンドポイントとして罹患データの活用ができたならば、より精度の高い解析結果が得られることが期待される。

原子力作業員の循環器系疾患死亡率の線量率効果： ハンフォードデータの再解析

Effect of radiation dose rate on circulatory disease mortality among nuclear workers:
Reanalysis of Hanford data

○佐々木 道也¹、工藤 伸一²、古田 裕繁² (¹電中研、²放影協)

○M. Sasaki¹, S. Kudo², H. Furuta² (¹CRIEPI, ²REA)

1. はじめに

放射線被ばくによる循環器系死亡の線量率効果を評価するため、米国ハンフォードサイトの個人データを活用し、特定の年線量(区分線量率)以上の線量の累積値と、区分線量率未満の線量の累積値それぞれに対する循環器系疾患死亡リスクを解析した。

2. 方法

解析データは米国の CEDR¹⁾の Analytic Data File Sets より、三ヶ国研究²⁾で用いられたハンフォードデータを解析に供した。解析対象の集団は、既報のがん死亡リスク解析³⁾と同様、雇用期間、年間の最大被ばく線量、オフサイトの線量データ等を考慮して選定し、最終的に 32,988 人となった。心疾患、脳血管疾患及び循環器系疾患全体の死亡数は、ハンフォードデータに含まれている ICD-8 コードを参考にカウントした。

過剰相対リスク ERR/Sv は、 $\lambda = \lambda_0(1 + \beta d)$ の線形モデルを適用したポアソン回帰分析によって推定した。また、区分線量率を用いて解析する場合は、

$$\lambda = \lambda_0(1 + \beta_L d_L + \beta_H d_H) \dots (1)$$

の一次線形式を基本として推定した。ここで d_L は区分線量率より低い年線量のみを積算した累積線量であり、 d_H は区分線量率以上の年線量の累積線量である。

3. 結果と考察

区分線量率を用いない場合の循環器系疾患死亡の過剰相対リスク、及び尤度から推定した 90% 信頼区間は $-0.21/\text{Sv}(-0.78, 0.36)$ であった。次に、 2mSv/y から 40mSv/y まで 2mSv/y 刻みの区分線量

率に対して同様の過剰相対リスク β_L および β_H を (1)式を用いて推定した。結果を図 1 に示す。

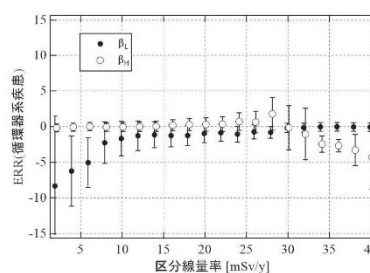


図 1 区分線量率と β_L 及び β_H の関係

本推定結果からは、区分線量率と β_L 及び β_H の全体的な傾向はがん死亡の場合³⁾と似ていることが分かった。一方、区分線量率が 6mSv/y 、あるいは 36mSv/y 程度付近において、統計的に有意な差異(負の値)が確認された。理由として、 6mSv/y 付近は系統的不確実性、あるいは線量率の効果が、 36mSv/y 付近に関しては、さらに大きい区分線量率の場合に ERR がより低下する傾向が認められるため、健康労働者生存効果が影響している可能性が考えられた⁴⁾。

参考文献

- 1) <https://oriseapps.ornl.gov/CEDR/>
- 2) E. Cardis et al.; Radiat Res. 142:117-132 (1995)
- 3) M. Sasaki, S. Kudo, H. Furuta. Health Phys. 117(1): 13-19 (2019)
- 4) M. Sasaki, S. Kudo, H. Furuta. Health Phys. in press.

放射線業務従事者における放射線と喫煙、飲酒との関連：
最新の生活習慣等アンケート調査結果

The correlation between radiation and smoking, alcohol consumption among Japanese nuclear workers: Results from the latest lifestyle questionnaire survey

○工藤伸一¹、西出朱美¹、吉本恵子¹、古田裕繁¹、三枝新¹ (¹放射協)

○S. Kudo¹, A. Nishide¹, K. Yoshimoto¹, H. Furuta¹, S. Saigusa¹ (¹REA)

【背景、目的】放射線影響協会（以下、放射協）では国の委託により放射線業務従事者を対象とした疫学調査を実施している。調査の一環として喫煙、飲酒等の生活習慣情報を得るためにこれまで実施した 2 度の自記式のアンケート調査からは、累積線量の増加と共に現在喫煙者が多いという正の相関が認められた。その結果、喫煙を調整した場合には放射線リスク推定値が減少するという知見が得られた。

2 度のアンケート調査はいずれも一部の従事者について実施したものであり、アンケートに回答していない従事者における喫煙状況等は不明であった。このため放射協では 2015 年度から 2019 年度にかけて、疫学調査の対象者となることの意味確認調査を行い、併せて 3 度目の生活習慣等アンケートを実施し、同意者から生活習慣等のデータを取得した。本報告ではその中から累積線量と喫煙、飲酒との関連について示す。

【方法】生活習慣等のアンケート調査票は自記式とした。2015 年 3 月末までに生存が確認できた 16.5 万人については調査票を郵送で配布した。また、原子力発電施設等の事業所において現に放射線業務に従事している約 6 万人を対象として調査票の現地配布を行った。

【結果】疫学調査の対象者となることに同意し、アンケート調査に回答した男性 77,993 人（回答率 39%）を解析対象者とした。2019 年 3 月 31 日時点の平均年齢は 59.4 歳（IQR: 50-70）、同日

までの平均累積線量は約 15.4mSv（IQR: 0-12.7）であった。

喫煙状況では、累積線量の増加と共に現在喫煙者の割合が増加する傾向、即ち累積線量と現在喫煙との間に正の相関が見られた。現在喫煙者を対象として一日あたりの喫煙本数が 30 本以上である者の割合を見た場合、累積線量との間に正の相関が見られた。

飲酒状況では累積線量との間に相関は見られなかった。現在飲酒者を対象として一日あたりの飲酒量が 3 合以上である者の割合を見た場合、累積線量との間に正の相関が見られた。

【結論】現在喫煙者割合、重度喫煙者割合、重度飲酒者割合について、累積線量との間に正の相関が見られた。これらの結果は今後、放射線リスクの推定を行う際に調整等、考慮すべきであることを示していると考えられた。

※ 本調査は原子力規制委員会原子力規制庁の委託業務として実施した。

原子力施設従事者の雇用機関、職種、時期別被ばく線量の状況：
J-EPISODE 新コホート

Dose exposed by nuclear workers by period, employer and job: New cohort of J-EPISODE

古田裕繁¹⁾、西出朱美¹⁾、工藤伸一¹⁾、吉本恵子¹⁾、三枝新¹⁾

H. FURUTA¹⁾, A. NISHIDE¹⁾, S. KUDO¹⁾, K. YOSHIMOTO¹⁾, S. SAIGUSA¹⁾

放射線影響協会 放射線疫学調査センター¹⁾

Institute of Radiation Epidemiology, Radiation Effects Association¹⁾

背景：原子力施設従事者コホートJ-EPISODEの第VI期調査(2015-2019)で新解析対象集団が確定した。今後、死因追跡に加え、全国がん登録DBとのリンケージによりがん罹患の追跡を行う。一方、線量は中央登録センターに登録されている記録線量を臓器吸収線量に換算して利用する方針である。なお、参加者全員からインフォームドコンセントを取得しており、生活習慣等のベースライン情報が全員について利用可能である。

目的：放射線リスク解析の基礎となる通常業務被ばく線量について、所属機関、企業規模、職種、被ばく時期等別線量分布、並びに、これまでの第V期解析対象者線量分布との相違を明らかにする。また、コホートに含まれる緊急作業該当者の状況とリスク推定上の課題を明らかにする。

資料・方法：①中央登録センターから取得した1957-2018年度の年度、被ばく事業所、作業区分(0:通常作業、1:緊急作業)別実効線量。

②2015-2019年に取得した生活習慣調査(喫煙、食習慣、体格、職種、教育等)回答データ。

方法はCross-section分析を用いた。期間はNPPの増設、線量低減工事などで比較的線量が高い1971-90年度、線量低減工事完了から東電福島原子力発電所事故(福島事故)前までの線量の低い1991-2009年度及び福島事故後の2010-18年度に区分した。線量は通常作業線量で、平均値よりも頑健な中位数を用いて比較した。

結果・考察：解析対象集団(男性)は7.8万人(継続6.4万人、新規1.4万人)で、新規の累積

線量の方が低い。企業規模別線量(中位数)は、いずれの期間も300人以下の方が高く、現場業務が多いことを反映していると考えられる。

雇用機関別線量は、1971-1990年度は、電力、その他、プラントメーカーの順であったが、1991年度以降は、その他、プラントメーカー、電力の順に変わった。

最終職位別線量は、いずれの期間も作業班長が最も高く、次いで担当者であった。



全期間を通した最長職種別線量は期間区分により異なる(図1)。1971-1990年度は放射線管理・工程管理が最も高かったが、2010-2018年度は廃炉作業で突出している。コホートに含まれる緊急作業該当者4,068人よりも、廃炉作業の方が、年齢構成が下方シフトしており、また、線量が高かった。業務に関する設問への無回答比率は70歳代以上、また、中卒で高く、無回答の方が回答者より線量が高い。

結論：一般の通常作業線量が低い中で、福島事故関連の緊急作業線量及び廃炉作業の通常業務線量は、作業環境、線種等も異なるので、リスク推計モデルでの線量の扱い、層別変数の無回答の扱い等を検討する必要がある。

謝辞：本研究は原子力規制庁の委託事業である。

PS24-01

Confounding of smoke to radiation health effects among Japanese nuclear workers : The previous results of cancer mortality analysis and future forecast

日本の放射線業務従事者における放射線による健康影響への喫煙交絡：これまでのがん死亡解析結果と今後の展望

○Shin'ichi Kudo, Akemi Nishide, Noboru Ishizawa, Hiroshige Furuta, Shin Saigusa
Radiation Effects Association

○工藤 伸一、西出 朱美、石沢 昇、古田 裕繁、三枝 新
放影協

Background Radiation Effects Association has carried out an epidemiological study on low-dose radiation effects (J-EPISODE : Japanese Epidemiological Study On low Dose Effect) which is entrusted by Nuclear Regulation Authority since 1991. Two life-style questionnaire surveys were examined in 1997 and 2003, and positive correlation between cumulative dose and smoking was found. As a result, adjustment for smoking reduced cancer risk estimate of mortality by radiation comparing with the estimate without adjustment for smoking. The study aims to provide the previous results of mortality analysis which observed 1999-2010 and future forecast based on the latest third life-style questionnaire survey performed 2015-2019. **Methods** In the mortality analysis, Poisson regression was used for calculate excess relative risk per Sievert (ERR/Sv). To obtain new information of life-style or socio-economic status, self-administered questionnaire was distributed to nuclear workers including retired workers. **Results** In the mortality analysis, total numbers of 71,733 male workers were assembled as cohort. The adjustment for smoking reduced ERR/Sv from 0.80 (90%CI : -0.39, 2.19) to 0.29 (-0.81, 1.57) for all cancers excluding leukemia. In the third life-style questionnaire survey, 77,993 male workers responded and positive correlation between radiation and smoking was found. **Conclusions** The adjustment for smoking reduced ERR/Sv in the previous analysis. A positive correlation between radiation and smoking which was found in the latest life-style questionnaire survey suggests that the adjustment for smoking should reduce ERRs/Sv in the future analysis. This work was funded by Nuclear Regulation Authority, Japan.

PS24-02

Reanalysis of the nuclear worker cohort J-EPISODE with follow-up period 1991-2010 using organ-absorbed dose

放射線業務従事者コホート J-EPISODE (追跡期間 1991-2010) の臓器吸収線量を用いた再解析

○Hiroshige Furuta, Akemi Nishide, Shin'ichi Kudo,
Noboru Ishizawa, Shin Saigusa

Radiation Effects Association

○古田 裕繁、西出 朱美、工藤 伸一、石沢 昇、三枝 新
(公財)放射線影響協会

Background and aim: Japanese Epidemiological Study on Low-Dose Radiation Effects (J-EPISODE) has analyzed health effects in association with photon exposure assessed in $H_p(10)$ since 1990. However, it is under way to estimate cancer morbidity and mortality risk for a new cohort set up in 2019 in terms of organ-absorbed dose. The study aims to reanalyze cancer mortality risk for J-EPISODE fifth analysis with follow up period 1991-2010 using organ-absorbed dose. **Materials and methods:** The reconstruction method of organ-absorbed dose principally followed the approach adopted in the IARC 15-Country Collaborative Study. However, the method in the study was modified considering actual usage practice of dosimeters in Japan and body size of Japanese. Conversion coefficient from dosimeter reading to organ-absorbed dose was computed using dosimeter response defined as reading per air kerma, and coefficient from air kerma to organ-absorbed dose; which was followed by reconstruction of organ-absorbed dose for subjects of J-EPISODE during 1957 to 2010. Then, Poisson regression method was applied for estimating Excess Relative Risk per Gray (ERR/Gy) for all and specific cancer mortality, in the same way as the fifth analysis of J-EPISODE, both for all 204,103 subjects and for a part of 71,733 subjects with life-style information. **Results:** Conversion coefficient from reading to organ-absorbed dose was approximately 0.8 Gy/Sv. The estimated ERRs/Gy for all and specific cancer mortality in terms of organ-absorbed dose were consistent with the fifth analysis, revealing that risk estimation using organ-absorbed dose became applicable for J-EPISODE. This work was funded by Nuclear Regulation Authority, Japan.

SS9

Reanalysis of Cancer Mortality Risk in Association with Organ Absorbed Dose for Japanese Nuclear Workers 1991-2010

Hiroshige Furuta^{1*}, Akemi Nishide¹, Shin'ichi Kudo¹, Keiko Yoshimoto¹, Shin Saigusa¹

¹Radiation Effects Association, Japan

*furuta@rea.or.jp

Background: Japanese Epidemiological Study on Low-Dose Radiation Effects (J-EPISODE) has analyzed health effects in association with photon exposure assessed in $H_p(10)$ since 1990. However, it is under way to estimate cancer morbidity and mortality risk evaluated in organ absorbed dose, which is recommended by ICRP.

Aim: To reconstruct organ absorbed dose during 1957 to 2010, and reanalyze cancer mortality risk for J-EPISODE 1991-2010.

Materials and methods: The reconstruction method of organ dose principally followed the approach adopted in the IARC 15-Country Collaborative Study. However, the method was modified considering recent usage practice of dosimeters in Japan and body size of Japanese. Despite the IARC's framework with $H_p(10)$ being the common quantity, it was simplified using air kerma as common quantity (Figure 1).

[1] The preceding studies on Japanese NPPs in 1980s were found to confirm that the assumptions of distribution of energy and geometry of photon exposure in IARC study were applicable for J-EPISODE.

[2] Dosimeter response data, defined as readings per air kerma, under combinations of a specific photon energy; 119,

207 and 662 keV, and a specific geometry; antero-posterior geometry and isotropic geometry, were newly experimented in the same way as IARC study for recently used three types of dosimeters; glass badge (GB), electronic personal dosimeter (EPD) and optically stimulated luminescence (OSL) dosimeter, while those for film badge (FB) and thermoluminescence dosimeter (TLD) referred IARC study data.

[3] Conversion coefficients from air kerma to organ absorbed dose were developed for Japanese adult male voxel phantom (JM-103) in order to compare with Caucasoïd phantom.

[4] Finally, conversion coefficients from readings to organ absorbed dose were computed using the above data on dosimeter response as well as coefficients from kerma to organ absorbed dose for each year and each site where workers were exposed to photon, followed by reconstruction of organ absorbed dose for subjects of J-EPISODE during 1957 to 2010. Then, Poisson regression method was applied for estimating ERR (Excess Relative Risk) for cancer mortality.

Results: 1) The IARC assumptions of energy and geometry distribution were applicable.

2) Dosimeter response among dosimeter types demonstrated small differences.

3) Conversion coefficients for JM-103 revealed small differences from Caucasoïd.

4) Conversion coefficients from readings to organ absorbed dose (Gy/Sv) were around 0.7 to 0.8.

5) Organ absorbed dose for several tissues was reconstructed from the recorded dose during 1957 to 2010.

6) ERRs for cancer mortality were estimated in terms of organ absorbed dose.

Conclusion: Evaluation method of cancer morbidity and mortality risk in association with organ absorbed dose, which is recommended by ICRP, became applicable for Japanese nuclear workers.

Keywords: Epidemiology, Organ absorbed dose, Nuclear worker

ACKNOWLEDGMENTS: This work was funded by Nuclear Regulation Authority, Japan.

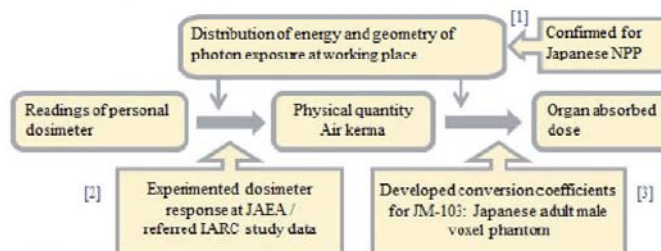


Fig. 1. Framework converting readings of personal dosimeter to organ absorbed dose



Home

Next Session

Previous Session

Poster Session T1

PS1 (T1.1-1181)

Cohort profile of the Japanese epidemiological study on low-dose radiation effects (J-EPIISODE)

Shin'ichi Kudo^{1*}, Akemi Nishide¹, Keiko Yoshimoto¹, Hiroshige Furuta¹, Noboru Ishizawa¹, Shin Saigusa¹

¹ Radiation Effects Association, Japan

*s_kudo@rea.or.jp

The Institute of Radiation Epidemiology of the Radiation Effects Association has examined radiation epidemiological study among Japanese nuclear workers since 1990. A new study was designed with a background of that incidence data were needed in addition to mortality data and so on. The new study has been conducted during 2015 to 2019 to obtain new informed consent and information of confounding factors by lifestyle questionnaire survey. For those expressed agreement to informed consent were requested to answer the lifestyle questionnaire simultaneously. The questionnaire was the self-administered and included questions about lifestyle such as smoking and occupation, etc. The documents were distributed in two ways. The first was distributing by mail to those included in the previous cohort whose their name, addresses and dose records were identified. The second was distributing to those currently working through the organization of nuclear facilities such as nuclear power plants, research institute, and fuel processing companies. The worker who replied in the second way, data linkage with database which is maintained by Radiation Dose Registration Center by using their name, date of birth and address have performed to link their dose records. Based on these surveys, a new cohort which was comprised by 77,993 male workers was established. The mean cumulative dose was 15.4 mSv and the mean age was 59.4 years at the end of March, 2019. The workers who had exposed less than 5 mSv or who were over 60 years old occupied half and over. Duration of work, type of employer, job category, years of education, smoking status and body mass index showed correlation with cumulative dose. Alcohol consumption did not show the correlation. These results suggest that the estimated excess relative risks per sievert will reduce by adjustment for them as same with the previous analysis¹⁾. The characteristics of new cohort denoted that adjustment for lifestyle or socioeconomic status should be needed in future analysis.

Keywords: Epidemiology, Cohort study, Nuclear worker

ACKNOWLEDGMENTS: This work was funded by Nuclear Regulation Authority, Japan.

Reference

- 1) S. Kudo, J. Ishida, K. Yoshimoto, S. Mizuno, S. Ohshima, H. Furuta and F. Kasagi: Direct adjustment for confounding by smoking reduces radiation-related cancer risk estimates of mortality among male nuclear workers in Japan, 1999-2010., *J. Radiol. Prot.*, 38, 357-371 (2018).

O-013

全国がん登録情報2016年分とJ-EPISODE原子力施設作業員コホートとのリンケージ

○古田 裕繁、工藤 伸一、石沢 昇、三枝 新

(公財)放射線影響協会

【背景】放射線影響協会は国の委託により1990年から放射線業務従事者の健康影響に関する疫学調査J-EPISODEを実施している。2015-19年度に同意者から構成される新しいコホートを再設定し、今後臓器線量とがん罹患との関連の解析を行う。

【目的】解析対象集団と2016年全国がん登録データとのリンケージ(照合)を行い、年齢、部位別がん罹患状況を把握し、照合方法等の評価を行う。

【方法】解析対象集団は当協会放射線従事者中央登録センターに登録されている日本人男性のうち、調査対象者となることに同意した者で、住民票取得による生死・住所の追跡が可能な適格者77,993人であった。全国がん登録法第17条に基づく非匿名化情報の利用申請後、国立がん研究センターで照合を行うため、解析対象集団の氏名、生年月日、性別、住所、データ識別番号からなる外部照合データ約26万件を作成した。住所は生死追跡で把握した複数の住所履歴情報を用いた。照合結果を評価するために、厚労省「全国がん登録罹患数・率報告」基本分類A表の定義に基づき年齢、部位別がん罹患数を集計し、標準化罹患比(SIR)を推計した。悪性新生物症例数はICD10コードC00-C96に該当するものの内、統計対象を採用した。第一原発がんは、全国がん登録制度発足後に初めて原発がんと診断されたものと定義した。

【結果】照合の結果マッチしたレコードから同一人の同一症例を重複排除した悪性新生物罹患数(統計対象区分)は684症例、うち第一原発がんは669症例であった。男性高齢者が多いことから、前立腺、胃、大腸、肺などで症例が多かった。解析対象集団男性のSIRは70%、死亡情報のみのDCO%は0.3%であった。

【結論】全国がん登録罹患数のMI比は0.37、DCO%は3.2%と地域がん登録時代に比べ精度が格段に改善している一方、解析対象集団のSIRが低目であったが、がん登録制度の変化等に伴う罹患数把握の課題も指摘されており、今後全国がん登録制度の安定化を見守る必要がある。全国がん登録データとの照合が確認できたことから今後の追跡による放射線のがん罹患リスク推定の可能性が明らかとなった。

【利益相反】無

(注)1. 本研究は原子力規制庁の委託事業である。
2. 本研究のがん罹患情報は、全国がん登録法に基づき非匿名化情報の提供を受け、独自に作成・加工したものである。

4. 2 論文発表

- (1) Direct Risk Comparison between Radiation and Smoking on Cancer Mortality among Nuclear Workers in Japan (J-EPISODE). *Jpn. J. Health Phys.* 55, 32-39, 2020.

Jpn. J. Health Phys., 55 (1), 32 ~ 39 (2020)

DOI: 10.5453/jhps.55.32

Original Paper

Direct Risk Comparison between Radiation and Smoking on Cancer Mortality among Nuclear Workers in Japan (J-EPISODE)

Shin'ichi KUDO,^{*1, #} Akemi NISHIDE,^{*1} Jun'ichi ISHIDA,^{*1} Keiko YOSHIMOTO,^{*1}
Hiroshige FURUTA^{*1} and Fumiyoshi KASAGI^{*1}

(Received on August 5, 2019)

(Accepted on November 29, 2019)

The health effects of low-dose or low-dose rate of radiation are still controversial. There is little evidence to show if radiation risk is greater than other risks, such as lifestyle or socio-economic factors, including smoking. This study aimed to directly compare radiation and smoking risk on cancer mortality by deriving both risk factors simultaneously from one cohort. The study population was Japanese nuclear workers who were engaged until the end of March, 1999. A lifestyle questionnaire was distributed in 1997 and 2003 and smoking information was obtained. Radiation dose was supplied by Radiation Dose Registration Center in Radiation Effects Association. Poisson regression was used to derive radiation excess relative risk (ERR) per 100 mSv and smoking (ERR) per 20 pack-years. Radiation doses were lagged by 10 years. There were 71,733 subjects. The total person-years was 591,000, and the number of deaths for all cancers excluding leukemia was 1,326. For all cancers excluding leukemia, the ERR of radiation per 100 mSv was 0.08 (90% CI: -0.08, 0.28), and the ERR of smoking per 20 pack-years was 0.57 (90% CI: 0.44, 0.73). In addition to all cancers excluding leukemia, stomach cancer, lung cancer, smoking-related cancers showed significantly smaller radiation ERRs than smoking ERRs. These results suggest that, even if a low-dose radiation risk existed, it was much smaller than smoking risk.

KEY WORDS: low dose radiation, radiation risk, smoking risk, cancer, cohort study, epidemiological study.

I INTRODUCTION

Although health effects of high-dose or high-dose rate of radiation based on the studies of atomic bomb survivors¹⁻³⁾ has been demonstrated, the health effects of low-dose or low-dose rate of radiation are still controversial. There is little evidence to show if radiation risk is greater than other risks, such as lifestyle or socio-economic factors, including smoking.

Some studies have compared the risk between radiation and smoking,⁴⁻⁶⁾ however, comparison between cumulative radiation dose and total amount of smoking among nuclear workers are limited.

The Institute of Radiation Epidemiology (IRE) of Japan's Radiation Effects Association (REA) commenced an epidemiological study on low-dose radiation effects (J-EPISODE) among radiation workers in Japan in 1990. To examine non-radiation factors among radiation workers, the IRE conducted lifestyle questionnaire surveys among a sample of workers in 1997⁷⁾ and 2003.

The present study aimed to quantify the excess relative risk (ERR) of both radiation and smoking that were derived simultaneously from one cohort, and to directly compare the two risk factors.

II MATERIALS AND METHODS

1. Ethics statement

All procedures involving human participants were in accordance with the ethical standards of the institutional and/or national research committee and with the 1964 Helsinki declaration and its later amendments or comparable ethical standards. The study protocol was based on the Ethical Guidelines for Medical and Health Research Involving Human Subjects established jointly by Japan's Ministry of Health, Labour, and Welfare, and Ministry of Education, Culture, Sports, Science, and Technology. This work was reviewed and approved by the Research Ethics Committee of the REA.

2. Cohort definition and follow-up of vital status

We conducted a follow-up of Japanese workers who registered in the Radiation Dose Registration Center (RADREC), which manages workers' radiation dose records from nuclear facilities as of the end of March 1999. Copies of the workers' residence registration cards (RRCs) were acquired from local government offices to ascertain their vital statuses. Copies of RRCs were issued when subjects were alive, and copies of deleted residence records, including death dates or new addresses, were issued when subjects were deceased or had moved.

For those whose deaths could be ascertained through RRCs, causes of death were obtained by record linkage with the death

^{*1} Institute of Radiation Epidemiology, Radiation Effects Association; 1-9-16 Kajicho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0044, Japan.

[#] Corresponding author; E-mail: s_kudo@rea.or.jp

records approved for use and provided by Japan's Ministry of Health, Labour and Welfare. Indices used for record linkage were date of birth, date of death, sex, and municipality code of residence.⁹⁾ A process to obtain individual informed consent through an opt-out method was performed from 2007–2009. The opt-out rate was approximately 7%. For those whose data we obtained but who later refused participation, we stopped all follow-up efforts, but included them among their cohort until the last day on which their vital statuses were known. The primary framework of the study population and follow-up methods of the J-EPISODE have been described in detail in previous papers.^{9–13)}

3. Dosimetry

For this study, the individual recorded doses, including photon, internal, and neutron doses, were used. The photon doses were the external exposure records of equivalent doses at a tissue depth of 10 mm [$H_p(10)$ (mSv)] for all workers in nuclear facilities who are registered in the RADREC dose database. Neutron doses and internal doses were monitored, but cases above the level to be recorded were rare. If they were detected, they were added to external doses. The dose records used in the analysis included the individual's amount that consisted of external, internal, and neutron doses by fiscal year. In the present study, exposures below the detectable level were set as zero mSv.

The use of nuclear energy in Japan commenced in 1957. Therefore, the dosimetry records of workers from 1957 to the time before the RADREC launched the registration in 1978, were retrospectively provided to the RADREC by the respective nuclear facilities that had stored the data. The present study covers radiation dose records from 1957 to 2010.

4. Lifestyle questionnaire survey

To examine factors potentially confounding the risk assessment of nuclear workers, lifestyle questionnaire surveys were performed twice (1997 and 2003) to a sample of workers. The questionnaire was self-administered and included questions on smoking, alcohol intake, and history of engaging in work involving hazardous materials, such as asbestos, benzene, etc. The first survey's questionnaire (1997–1999) was distributed to 55,271 workers in nuclear facilities; and almost all respondents were working at the time of the survey. The second survey's questionnaire (2003–2004) was distributed to 73,542 workers by postal mail to those who were 40 years old or more on July 1, 2003. Based on cumulative doses as of March 31, 2002, all workers exposed to 10 mSv or more were surveyed, while 40% of workers with less than 10 mSv were sampled. The questions in the second survey were almost identical to those of the first survey, with questions on socio-economic status such as years of education added. For those who answered both surveys, the first survey's answers were analyzed in this study. Female workers were also distributed to but were not included in the analysis because number of the responses from female workers was too small (387 workers). Those whose smoking status or pack-years were unknown were excluded.

5. Risk comparison strategy

To compare radiation and smoking risks, we had to set some assumptions on model and unit. In this study, a linear model was assumed to apply to both radiation and smoking. In radiation epidemiology field, a linear model is broadly used, although a linear no threshold (LNT) model is still controversial. The consensus is that determining low-level radiation risk is difficult due to a huge cohort that is needed to increase statistical power and adjustment for confounding factors such as lifestyle or socio-economic status is generally limited. LNT can be considered as a possible model under such situations. Therefore, a linear model was used for radiation risk estimate. To facilitate a comparison, linear model was also used for smoking.

For risk estimate units, both radiation risk estimate and smoking risk estimate vary by their unit. Workers who were exposed to over 100 mSv comprised approximately 5% of the whole cohort. Therefore, radiation risk estimate was based on 100 mSv to avoid underestimation of radiation risk. Smoking risk estimate was based on 20 pack-years to allow comparison with other studies.

6. Statistical analysis

All individuals contributed person-years from two years after the response date of the questionnaire¹⁴⁾ until the earliest of (a) the date of final confirmation of vital status, (b) the date of death, or (c) December 31, 2010. Poisson regression models were applied to analyze radiation risks and smoking risks.^{12,13,15–18)} Each individual's last residence was used to stratify respondents into eight regions within Japan. Given the differences between the characteristics of respondents to the first and second lifestyle surveys, as described above in the "lifestyle questionnaire survey" section, a binary indicator was used to show whether the first or the second survey was used for analysis.

Radiation cumulative doses were categorized into 14 groups by mSv levels: 0, >0, 1–, 2–, 3–, 5–, 7.5–, 10–, 15–, 20–, 25–, 50–, 100–, 200+. Cumulative radiation doses were updated monthly, with the assumption that annual doses were distributed uniformly over the year. Cumulative doses were lagged by ten years.^{12,13,15–18)} The pack-years was defined as follows: the number of cigarettes per day \times (1 pack/20 cigarettes) \times duration of smoking (the number of years since the age at which an individual started to smoke, through the age on the survey date for current smokers). Pack-years were categorized into eight groups: 0, >0, 10–, 15–, 20–, 25–, 30–, 50+. We used only pack-years for current smokers and added former smoker indicator as an adjusted variable. Adjustment variables were attained age, calendar year, birth year, residence, binary indicator of lifestyle questionnaire survey, and binary indicator of former smoker. Cumulative dose, attained age, and calendar period were treated as time-dependent variables. The model used to estimate radiation and smoking risks was a linear additive model (1):

$$\lambda = \lambda_0(a, c, y, r, s) \exp(\alpha z) (1 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2) \quad (1)$$

We also fitted the data to a linear multiplicative model (2) and a log-linear model (3).

$$\lambda = \lambda_0(a, c, y, r, s) \exp(\alpha z) (1 + \beta_1 z_1) (1 + \beta_2 z_2) \quad (2)$$

$$\lambda = \lambda_0(a, c, y, r, s) \exp(\alpha z + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2) \quad (3)$$

where λ is the death rate at dose z_1 and pack-years z_2 , λ_0 is the background death rate (stratified by a : attained age (20-, 25-, ..., 100+), c : calendar period (<2000, 2000–2004, 2005–2010), y : year of birth (<1920, 1920-, 1925-, ..., 1970+), r : region (divided into eight areas), and s : survey indicator (1st, 2nd)), z indicates former smokers (1 = former smoker, 0 = current smoker or never smoker); z_1 represents the person-year weighted cumulative dose, and z_2 represents the person-year weighted pack-years for current smokers. α represents the coefficient of z and denotes relative risk for former smokers, and β_1 and β_2 represent the coefficient of z_1 and z_2 , respectively. The unit of z_1 was 100 mSv, and the unit of z_2 was 20 pack-years. Therefore, β_1 denotes radiation ERR per 100 mSv, and β_2 denotes smoking ERR per 20 pack-years. ERR denotes an increase of risk by radiation or smoking, namely it is equivalent to relative risk minus one. We also calculated the 90% confidence interval (CI) based on likelihood. When CI based on likelihood was not converged, CI based on Wald was calculated. Doses were lagged by 10 years, and sensitivity analyses were examined under five- and 15-year lag assumptions, in addition to a 10-year lag. In addition, we verified an interaction between radiation and smoking by using the model as follows (4):

$$\lambda = \lambda_0(a, c, y, r, s) \exp(\alpha z) (1 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_{12} z_1 z_2) \quad (4)$$

where $z_1 z_2$ denotes interaction term of z_1 (radiation) and z_2 (smoking) and β_{12} represent the coefficient of $z_1 z_2$.

The person-year table was created and the models were fitted using Epicure software.¹⁹⁾ Using this model, we compared the ERRs of both radiation and smoking.

III RESULTS

There were 75,442 male workers who responded to the questionnaire survey. There were 3,709 workers (5%) excluded due to unknown smoking status. As a result, 71,733 with smoking information were analyzed as the present study cohort. **Table 1** shows the cohort characteristics. There were approximately 591,400 person-years accumulated from 1999 to 2010 by 71,733 cohort members. The mean of cumulative radiation dose which were lagged by 10 years and pack-years at the end of follow-up was 21.0 mSv and 27.8 pack-years, respectively. The age at the end of follow-up was 56.2 years old.

Table 2 denotes the proportion of subjects by the pack-years and dose categories at the end of follow-up. Some dose categories are combined for clarification purposes. The table illustrates positive correlation between the pack-years and radiation dose (p -value of Pearson correlation²⁰⁾ < 0.001). Namely, the proportion of non-smokers decreases with increasing dose categories, while the proportion of current smokers with 30 or more pack-years increases with increasing dose categories. More than half of workers are classified in the <5 mSv dose category, while 5% of workers are classified in the 100+ mSv dose category.

Table 3 shows the distribution of deaths, person-years and mean attained age by dose category, smoking status and pack-years. The mean attained age showed a positive trend with cumulative dose and pack-years.

The results derived by model (1, 2, 3) were almost identical. For all cancers excluding leukemia, the ERR of radiation per 100 mSv was 0.08 (90%CI: -0.08, 0.28) and the ERR of smoking per 20 pack-years was 0.57 (0.44, 0.73) by linear additive model. The ERR of radiation per 100 mSv was 0.03 (90%CI: -0.08, 0.16) and the ERR of smoking per 20 pack-years was 0.56 (0.43, 0.72) by linear multiplicative model. The ERR of radiation at 100 mSv was 0.04 (90%CI: -0.07, 0.15) and the ERR of smoking at 20 pack-years was 0.30 (0.25, 0.36)

Table 1 Characteristics of Japanese nuclear workers.

Follow-up period		1999–2010
Number of subjects		71,733
Person-years		591,400
Age at first radiation exposure	Mean	30.0
	Median (IQR)	27 (21–37)
Duration of radiation exposure (Years)	Mean	17.1
	Median (IQR)	17 (6–26)
Cumulative radiation dose at the end of follow-up (mSv, Lagged by 10 years)	Mean	21.0
	Median (IQR)	4.5 (0.1–22.7)
Age at start to smoke ^a	Mean	19.5
	Median (IQR)	20 (18–20)
Duration of smoking ^a (Years)	Mean	24.1
	Median (IQR)	24 (14–33)
Pack-years ^a	Mean	27.8
	Median (IQR)	25.0 (13.0–38.0)
Age at the end of follow-up	Mean	56.2
	Median (IQR)	56 (47–65)

^a: Calculated among current smoker ($N=41,495$).

Table 2 Number of subjects by smoking status, pack-years, and dose categories at the end of follow-up among Japanese nuclear workers.

Smoking status	Pack-years	Dose categories (mSv) ^a								Total
		0	>0	5-	10-	20-	50-	100-	200+	
Never	0	3,954 (25.2%)	5,085 (24.2%)	1,331 (21.5%)	1,759 (18.9%)	1,862 (17.8%)	833 (15.1%)	388 (13.6%)	78 (10.8%)	15,290 (21.3%)
	Former	3,716 (23.7%)	4,064 (19.4%)	1,114 (18.0%)	2,092 (22.4%)	2,154 (20.6%)	1,107 (20.1%)	564 (19.8%)	137 (18.9%)	14,948 (20.8%)
Current	>0	1,483 (9.5%)	2,966 (14.1%)	892 (14.4%)	902 (9.7%)	845 (8.1%)	322 (5.8%)	74 (2.6%)	10 (1.4%)	7,494 (10.4%)
	10-	1,472 (9.4%)	2,507 (11.9%)	848 (13.7%)	1,126 (12.1%)	1,387 (13.3%)	738 (13.4%)	333 (11.7%)	51 (7.0%)	8,462 (11.8%)
	20-	1,520 (9.7%)	2,169 (10.3%)	713 (11.5%)	1,141 (12.2%)	1,436 (13.7%)	914 (16.6%)	487 (17.1%)	133 (18.4%)	8,513 (11.9%)
	30+	3,545 (22.6%)	4,203 (20.0%)	1,283 (20.8%)	2,304 (24.7%)	2,778 (26.6%)	1,598 (29.0%)	1,000 (35.1%)	315 (43.5%)	17,026 (23.7%)
	Total	15,690 (100%)	20,994 (100%)	6,181 (100%)	9,324 (100%)	10,462 (100%)	5,512 (100%)	2,846 (100%)	724 (100%)	71,733 (100%)
Proportion by dose category		21.9%	29.3%	8.6%	13.0%	14.6%	7.7%	4.0%	1.0%	100%

Note: Parentheses indicate percentage of pack-years within each dose category. Some categories are combined for clarification purposes.

^a: Lagged by 10 years.

Table 3 Distribution of deaths, person-years and mean attained age by dose category, smoking status and pack-years among Japanese nuclear workers.

	Cause of death						Person-years/ 10 ^d	Mean attained age
	All cancers excluding leukemia	Stomach cancer	Liver cancer	Lung cancer	Smoking- related cancers ^b	Nonsmoking- related cancers ^c		
Total	1,326	218	138	319	952	322	59.1	49.3
Cumulative dose (mSv)								
0	313	58	31	68	223	79	19.3	44.9
>0	312	44	33	65	206	92	16.5	48.8
5-	107	16	8	33	82	22	4.5	50.0
10-	181	31	14	45	128	44	6.1	53.2
20-	214	37	25	54	166	42	6.9	53.6
50-	132	24	17	33	97	31	3.6	54.7
100-	47	5	9	17	38	7	1.8	56.2
200+	20	3	1	4	12	5	0.4	58.7
Smoking status Pack-years ^d								
Never	155	26	19	19	94	50	12.7	48.1
Former	372	53	35	89	247	110	10.8	56.9
>0	21	6	1	3	13	6	7.6	33.6
Current	10-	52	9	5	7	11	8.2	42.0
20-	386	59	45	102	283	91	10.7	53.5
30+	340	65	33	99	278	54	9.2	56.6

^a: Calculated among current smokers. (Zero for non-smokers.)

^b: Buccal and pharynx, esophagus, stomach, liver, pancreas, nasal cavity, larynx, lung, bladder, kidney, ureter. C00-C16, C22, C25, C30.0, C31-C34, C64-C67.

^c: All solid cancers other than smoking-related cancers.

C17-C21, C23-C24, C26-C29, C30.1-C30.9, C35-C63, C68-C80.

by log-linear model. These results showed lower radiation ERR compared with smoking ERR by all models and suggests that our results were robust. The linear additive model showed the best fit in all causes of death except non-smoking related cancers. AIC's of all cancers excluding leukemia were 9,540.680 for the linear additive model, 9,541.092 for the

linear multiplicative model and 9,554.756 for the log-linear model, respectively. Therefore, the results from the linear additive model were used for the rest of the analysis.

Table 4 shows the ERRs and 90% CIs of radiation and smoking. No significantly higher ERR per 100 mSv was shown, while significantly higher ERRs per 20 pack-years

Table 4 Excess relative risk and 90% confidence interval of radiation and smoking by cause of death among Japanese nuclear workers.

Causes of Death	ICD10 codes	Observed Deaths	Radiation ERR per 100 mSv 90%CI	Smoking ERR per 20 pack-years 90%CI
All cancers excluding leukemia	C00–C97 except C91–C95	1,326	0.08 (–0.08, 0.28)	0.57 (0.44, 0.73)
Stomach cancer	C16	218	–0.24 (–0.55, 0.05) ^c	0.71 (0.33, 1.09) ^c
Liver cancer	C22	138	0.71 (–0.004, 1.89)	0.61 (0.26, 1.25)
Lung cancer	C33–C34	319	0.19 (–0.21, 0.81)	2.14 (1.33, 3.49)
Smoking-related cancers ^a		952	0.09 (–0.13, 0.37)	0.87 (0.65, 1.13)
Nonsmoking-related cancers ^b		322	–0.04 (–0.30, 0.22) ^c	0.18 (0.03, 0.33) ^c

^a: Buccal and pharynx, esophagus, stomach, liver, pancreas, nasal cavity, larynx, lung, bladder, kidney, ureter. C00–C16, C22, C25, C30.0, C31–C34, C64–C67.

^b: All solid cancers other than smoking-related cancers. C17–C21, C23–C24, C26–C29, C30.1–C30.9, C35–C63, C68–C80.

^c: Wald based confidence interval.

were shown in all analyzed causes of death. For all cancers excluding leukemia, significantly smaller radiation ERRs (0.08 (90%CI: –0.08, 0.28)) compared with smoking ERRs (0.57 (0.44, 0.73)) were observed. Stomach cancer, lung cancer, and smoking-related cancers also showed significantly smaller radiation ERRs compared with smoking ERRs. The radiation ERR for liver cancer (0.71 (–0.004, 1.89)) was higher than for smoking ERR (0.61 (0.26, 1.25)) with regards to point estimate.

For all cancers excluding leukemia, the ERR of radiation was 0.08 (90%CI: –0.08, 0.26) and the ERR for smoking was 0.57 (0.44, 0.73) when a five-year lag was assumed, and the ERR of radiation was 0.09 (–0.09, 0.30) and the ERR for smoking was 0.57 (0.44, 0.72) when a 15-year lag was assumed. The lags were adapted only to radiation and were not adapted to smoking. Therefore, the ERRs of smoking were quite stable. We verified that all cancers excluding leukemia, stomach cancer, lung cancer and smoking-related cancers showed significantly smaller radiation RRs compared with smoking RRs when lag assumptions were five or 15-years (data not shown for stomach cancer, lung cancer and smoking-related cancers).

We found no interaction between radiation and smoking. The *p*-values of coefficient of the interaction term were 0.415 for all cancers excluding leukemia, and the *p*-values of other causes of death were all greater than 0.1.

IV DISCUSSION

1. Principal findings

In this study, direct comparison between radiation risk and smoking risk on cancer mortality was examined. Significantly smaller radiation ERRs per 100 mSv compared with smoking ERRs per 20 pack-years were shown for all cancers excluding leukemia, stomach cancer, lung cancer, and smoking-related cancers. For all cancers excluding leukemia, ERR of radiation

per 100 mSv was approximately one seventh of smoking ERR per 20 pack-years. Considering that the mean cumulative dose of this cohort was 21.0 mSv, the estimated risk of cancer mortality by smoking per 20 pack-years was over 30 times larger than that of radiation risk for ordinary nuclear workers.

2. Liver cancer radiation risk

The radiation ERR for liver cancer was higher than other causes of death and the point estimate was also higher than for smoking ERR. We have examined the adjustment for alcohol consumption status as follows:

$$\lambda = \lambda_0(a, c, y, r, s) \exp(\alpha z + \gamma y)(1 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2) \quad (5)$$

where *y* denotes alcohol consumption status (1 = current drinker, 2 = former drinker, 3 = never drinker, 4 = unknown) and *γ* denotes coefficient of *y*. Exp(*γ*) means relative risk by each alcohol category. After adjustment for alcohol consumption status, the results were almost stable. The ERR of radiation was 0.72 (0.006, 1.90) and smoking ERR was 0.56 (0.22, 1.17). This suggests the possible existence of other factors, such as hepatitis virus^{21,22} or that radiation itself may increase ERR. However, the results of other radiation epidemiology studies showed no significant increase in liver cancer^{15,16}. The high radiation ERR for liver cancer might be caused by chance, but this cannot be verified.

3. Comparison with other studies

Table 5 shows the comparison of ERRs of radiation for all cancers excluding leukemia and lung cancer with other studies. An atomic bomb survivor's life span study (LSS),^{3,4} 15-country study¹⁵ (Pooled analysis include Australia, Belgium, Canada, Finland, France, Hungary, Japan, Korea, Lithuania, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland, UK and USA), National Registry for Radiation Workers' study¹⁶ (NRRW: Cohort study performed by UK), International

Table 5 Comparison of excess relative risk and 90% confidence interval of mortality by radiation with other studies.

Study	All cancers excluding leukemia	Lung cancer
	Observed deaths ERR per 100 mSv 90% CI	Observed deaths ERR per 100 mSv 90% CI
J-EPISODE	1,326 0.08 ^a (-0.08, 0.28)	319 0.19 ^a (-0.21, 0.81)
	5,235 0.03 ^{b,c} (0.02, 0.04) ^d	1,445 0.08 ^{b,c} (0.02, 0.15) ^d
LSS	5,024 0.10 ^e (0.03, 0.18)	1,457 0.19 ^e (0.05, 0.36)
	7,455 0.03 ^c (0.002, 0.06)	2,230 0.01 ^{c,f} (-0.04, 0.07)
NRRW-3	19,064 0.05 ^c (0.02, 0.08)	5,802 0.05 ^c (0.00, 0.11)
		446 0.01 ^g (-0.004, 0.04) ^d
Mayak		

^a: Derived by linear additive model.^b: All solid cancers.^c: Derived by linear model.^d: 95% confidence interval.^e: Incidence.^f: Trachea, bronchus and lung cancer.^g: Derived by linear multiplicative model.

Nuclear Workers Study^{17,18}) (INWORKS: Pooled analysis include UK, US, France) and study of Russia's Mayak nuclear facility⁹) were chosen for comparison of radiation risk. The ERR for all cancers excluding leukemia of present study per 100 mSv was comparable with other studies. The ERR for lung cancers of the present study was also comparable, although the point estimate of the present study was slightly higher than other studies.

Japan Collaborative Cohort Study for Evaluation on Cancer (JACC),²³) Japan Public Health Center-based Prospective Study on Cancer and Cardiovascular Diseases (JPHC),^{24,25}) Three-Prefecture Cohort study,²⁶) LSS³) and Mayak⁹) were chosen for comparison of smoking risk (Table 6). The ERR for all cancers excluding leukemia of present study per 20 pack-years was compatible with JPHC. However, the point estimate was lower than JACC, although the confidence interval overlapped. The ERR for lung cancer of the present study was compatible with JACC, JPHC and Three-Prefecture study, but was significantly lower than LSS or Mayak. This may be caused by the difference in pack-years unit. While, 20 pack-years was used in our study, 50 pack-years was used in the LSS study. The smoking category (current, former, never) was used in the Mayak study, and it showed exceptionally high

Table 6 Comparison of excess relative risk and 90% confidence interval of mortality by smoking with other studies.

Study	All cancers excluding leukemia	Lung cancer
	Observed deaths Smoking ERR 90% CI	Observed deaths Smoking ERR 90% CI
J-EPISODE	1,326 0.57 ^b (0.44, 0.73)	319 2.14 ^b (1.33, 3.49)
	2,513 0.93 ^{b,c} (0.72, 1.19) ^f	645 2.97 ^{b,c} (1.96, 4.32) ^f
JACC	342 0.41 ^{b,g} (-0.06, 1.10) ^f	1,354 3.69 ^b (2.32, 5.62) ^f
		339 1.10 ^b (0.62, 1.71) ^f
Three-Prefecture		1,445 5.70 ^b (4.10, 8.07) ^f
		446 9 ^b (5.4, 17) ^f
Mayak		

^a: Derived by linear additive model.^b: Smoking excess relative risk at 20 pack-years vs 0 pack-years.^c: Denoted as relative risk or hazard ratio in original paper.

They are denoted as excess relative risk in this table by extracting one.

^d: All cancers.^e: Smoking relative risk at 20-39 pack-years vs 0 pack-years.^f: 95% confidence interval.^g: Smoking relative risk at 20-29 pack-years vs 0 pack-years.^h: Smoking relative risk of current smoker vs non-smoker.ⁱ: Incidence.^j: Smoking excess relative risk at 50 pack-years vs 0 pack-years.

ERR (9, 95%CI (5.4, 17)). The most likely possibility was that many of the Russian workers smoked strong cigarettes, usually without filters and in large quantities, as stated by the authors.³⁾

Risk estimates of radiation in the present study were comparable with other studies (Table 5), while risk estimates of smoking were slightly smaller than in other studies (Table 6). Nevertheless, our study's results showed that radiation risks were smaller than smoking risks (Table 4). Therefore, it was likely that, if a low-dose radiation risk existed, it was much smaller than smoking risk.

4. Limitations and strengths of this study

Our study includes some limitations, one of which was deficiency of statistical power. Wide confidence intervals for radiation ERR comparing with other studies were caused by short person-years (591,400) and observed deaths (1,326 for all cancers excluding leukemia). Another limitation was

that smoking information was outdated to some extent, since the original questionnaires were performed in 1997 and 2003, while the follow-up period closed at the end of 2010. Significantly higher ERR per 20 pack-years was shown for nonsmoking-related cancer, although the point estimate was slightly smaller compared with other causes of deaths. This may be caused by confounding factors other than smoking. To overcome these limitations, a new lifestyle questionnaire survey is currently underway. The results of this new survey may lead to more conclusive results for future research.

V CONCLUSION

The present study provided the evidence suggesting that, even if a low-dose radiation risk for cancer mortality existed, it was much smaller than smoking risk. This study was important in deriving the risks of radiation and smoking simultaneously from one cohort.

ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful to Professor Richard Wakeford for his fruitful comments on the manuscript. We also thank the many people who provided support in developing and updating the cohort.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors indicated no conflicts of interest.

SOURCES OF FUNDING

This study was funded by the Nuclear Regulation Authority of the Government of Japan. The funder had no role in the study's design, data analysis, or data interpretation or in the writing of this manuscript.

REFERENCES

- 1) DA. PIERCE, Y. SHIMIZU, DL. PRESTON, M. VAETH and K. MABUCHI; Studies of the mortality of atomic bomb survivors. report 12, part I. cancer: 1950-1990, *Radiat. Res.*, **146**, 1-27 (1996).
- 2) DL. PRESTON, Y. SHIMIZU, DA. PIERCE, A. SUYAMA and K. MABUCHI; Studies of mortality of atomic bomb survivors. report 13: solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997, *Radiat. Res.*, **160**, 381-407 (2003).
- 3) K. OZASA, Y. SHIMIZU, A. SUYAMA, F. KASAGI, M. SODA, et al.; Studies of the mortality of atomic bomb survivors, report 14: an overview of cancer and noncancer diseases, *Radiat. Res.*, **177**, 229-243 (2012).
- 4) EK. CAHOON, DL. PRESTON, DA. PIERCE, E. GRANT, AV. BRENNER, et al.; Lung, laryngeal and other respiratory cancer incidence among Japanese atomic bomb survivors: an updated analysis from 1958 through 2009, *Radiat. Res.*, **187**, 538-548 (2017).
- 5) M. KREISHEIMER, ME. SOKOLNIKOV, NA. KOSHURNIKOVA, VF. KHOKHRYAKOV, SA. ROMANOW, et al.; Lung cancer mortality among nuclear workers of the Mayak facilities in the former Soviet Union, *Radiat. Environ. Bioph.*, **42**, 129-135 (2003).
- 6) ES. GILBERT, ME. SOKOLNIKOV, DL. PRESTON, SJ. SCHONFELD, AE. SCHADILOV, et al.; Lung cancer risks from plutonium: an updated analysis of data from the Mayak worker cohort, *Radiat. Res.*, **179**, 332-342 (2013).
- 7) M. MURATA, T. MIYAKE, Y. INOUE, S. OHSHIMA, S. KUDO, et al.; Life-style and other characteristics of radiation workers at nuclear facilities in Japan: base-line data of a questionnaire survey, *J. Epidemiol.*, **12**, 310-319 (2002).
- 8) T. IWASAKI, T. MIYAKE, S. OHSHIMA, S. KUDO and T. YOSHIMURA; A method for identifying underlying causes of death in epidemiological study, *J. Epidemiol.*, **10**, 362-365 (2000).
- 9) Y. HOSODA, M. KUBA, T. MIYAKE, S. KUDO, H. MATSUDAIRA, et al.; First analysis of mortality of nuclear industry workers in Japan, 1986-1992, *J. Health Phys.*, **32**, 173-184 (1997).
- 10) T. IWASAKI, M. MURATA, S. OHSHIMA, T. MIYAKE, S. KUDO et al.; Second analysis of mortality of nuclear industry workers in Japan, 1986-1997, *Radiat. Res.*, **159**, 228-238 (2003).
- 11) S. AKIBA and S. MIZUNO; The third analysis of cancer mortality among Japanese nuclear workers, 1991-2002: estimation of excess relative risk per radiation dose, *J. Radiol. Prot.*, **32**, 73-83 (2012).
- 12) S. KUDO, J. ISHIDA, K. YOSHIMOTO, S. MIZUNO, S. OHSHIMA, et al.; Fifth analysis of mortality of nuclear industry workers in Japan, 1991-2010, *Jpn. J. Health Phys.*, **51**, 12-18 (2016) (in Japanese).
- 13) S. KUDO, J. ISHIDA, K. YOSHIMOTO, S. MIZUNO, S. OHSHIMA, et al.; Direct adjustment for confounding by smoking reduces radiation-related cancer risk estimates of mortality among male nuclear workers in Japan, 1999-2010, *J. Radiol. Prot.*, **38**, 357-371 (2018).
- 14) MT. GOODMAN, H. MORIWAKI, M. VAETH, S. AKIBA, H. HAYABUCHI, et al.; Prospective cohort study of risk factors for primary liver cancer in Hiroshima and Nagasaki, Japan, *Epidemiology*, **6**, 36-41 (1995).
- 15) E. CARDIS, M. VRIJHELD, M. BLETNER, E. GILBERT, M. HAKAMA, et al.; The 15-country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: estimates of radiation-related cancer risks, *Radiat. Res.*, **167**, 396-416 (2007).
- 16) CR. MUIRHEAD, JA. O'HAGAN, RG. HAYLOCK, MA. PHILLIPSON, T. WILCOCK, et al.; Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: third analysis of the National Registry for Radiation Workers, *Br. J. Cancer*, **100**, 206-212 (2009).
- 17) DB. RICHARDSON, E. CARDIS, RD. DANIELS, M. GILLIES, JA. O'HAGAN et al.; Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS), *BMJ*, **351**, h5359 doi:10.1136/bmj.h5359 (2015).
- 18) DB. RICHARDSON, E. CARDIS, RD. DANIELS, M. GILLIES, R. HAYLOCK, et al.; Site-specific solid cancer mortality after exposure to ionizing radiation: a cohort study of workers (INWORKS), *Epidemiology*, **29**, 31-40

- doi:10.1097/ede.0000000000000761, (2018).
- 19) EPICURE [EpiWin]: [computer program], Version 1.81, Seattle HiroSoft International Corporation, (2008).
 - 20) J. ADLER and I. PARMRYD; Quantifying colocalization by correlation: the Pearson correlation coefficient is superior to the Mander's overlap coefficient, *Cytometry Part A*, **77**, 733–742 (2010).
 - 21) M. MORI, M. HARA, I. WADA, T. HARA, K. YAMAMOTO, et al; Prospective study of hepatitis B and C viral infections, cigarette smoking, alcohol consumption, and other factors associated with hepatocellular carcinoma risk in Japan, *Am. J. Epidemiol.*, **151**, 131–139 (2000).
 - 22) S. ISHIGURO, M. INOUE, Y. TANAKA, M. MIZOKAMI, M. IWASAKI, et al; Impact of viral load of hepatitis C on the incidence of hepatocellular carcinoma: a population-based cohort study (JPHC Study), *Cancer Lett.*, **300**, 173–179 (2011).
 - 23) K. OZASA; Smoking and mortality in the Japan collaborative cohort study for evaluation of cancer (JACC), *Asian Pac. J. Cancer Prev.*, **8**, Suppl: 89–96 (2007).
 - 24) M. HARA, T. SOBUE T, S. SASAKI, and S. TSUGANE; Smoking and risk of premature death among middle-aged Japanese: Ten-year follow-up of the Japan public health center-based prospective study on cancer and cardiovascular diseases (JPHC Study) Cohort I, *Jpn. J. Cancer Res.*, **93**, 6–14 (2002).
 - 25) L. ZHA, T. SOBUE, T. KITAMURA, Y. KITAMURA, N. SAWADA, et al.; Changes in smoking status and mortality from all causes and lung cancer: a longitudinal analysis of a population-based study in Japan, *J. Epidemiol.*, **29**, 11–17 (2019).
 - 26) T. MARUGAME, T. SOBUE, H. SATOH, S. KOMATSU, Y. NISHINO, et al.; Lung cancer death rates by smoking status: comparison of the three-prefecture cohort study in Japan to the cancer prevention study II in the USA, *Cancer Sci.*, **96**, 120–126 (2005).



工藤 伸一 (くどう しんいち)
 1991年、(公財)放射線影響協会放射線疫学調査センター統計課採用。2017年、2019年、日本保健物理学会論文賞受賞。2019年、首都大学東京大学院人間健康科学研究科人間健康科学専攻放射線科学域において、博士(放射線学)を取得。
 E-mail: s_kudo@rea.or.jp

- (2) Conversion Factor from Dosemeter Reading to Air Kerma for Nuclear Worker using Anthropomorphic Phantom for Further Conversion from Air Kerma to Organ-Absorbed Dose. *Radiat Prot Dosimetry*. 189, 371-383, 2020.

CONVERSION FACTOR FROM DOSEMETER READING TO AIR KERMA FOR NUCLEAR WORKER USING ANTHROPOMORPHIC PHANTOM FOR FURTHER CONVERSION FROM AIR KERMA TO ORGAN-ABSORBED DOSE

Hiroshige Furuta^{1,*}, Norio Tsujimura², Akemi Nishide¹, Shin'ichi Kudo¹ and Shin Saigusa¹

¹ Institute of Radiation Epidemiology, Radiation Effects Association, 1-9-16 Kaji-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0044, Japan

² Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Japan Atomic Energy Agency, Tokai-mura, Ibaraki 319-1194, Japan

*Corresponding author: furuta@rea.or.jp

Received 19 September 2019; revised 3 February 2020; editorial decision 18 March 2020; accepted 26 March 2020

Estimation of cancer risk based on the organ-absorbed dose is underway for the Japanese Epidemiological Study on Low-Dose Radiation Effects (J-EPISODE). The reconstruction method for the organ-absorbed dose follows the approach adopted in the IARC 15-Country Collaborative Study, which examined the dosimeter response to photon exposure for the old film badge (FB) type, a multi-element FB and a thermoluminescence dosimeter. Until 2000, the dosimeters used in Japan were almost the same in the IARC study, so IARC study data could be used as they were. However, since 2000, the type of dosimeter has been replaced with active personal dosimeters (hereafter called electronic personal dosimeters), radio-photoluminescent glass dosimeters (Glass badge) and optically stimulated luminescence dosimeters (Luminess badge). Hence, it was necessary to collect these data again. A dosimeter response experiment was conducted using a device that irradiated an anthropomorphic phantom in the Japan Atomic Energy Agency calibration laboratories. The aim of the paper is to provide a conversion factor from reading in terms of $H_p(10)$ to air kerma for realistic conditions for further conversion from air kerma to organ-absorbed dose. The obtained dosimeter responses for the dosimeter types currently used in Japan were consistent with those in the IARC study. These data will be utilized for J-EPISODE in reconstructing the organ-absorbed dose.

INTRODUCTION AND AIM

The Japanese Epidemiological Study on Low-Dose Radiation Effects (J-EPISODE)⁽¹⁾ has been conducted since 1990 and has analyzed the health effects associated with radiation exposure evaluated as the personal dose equivalent, $H_p(10)$. However, the evaluation of cancer morbidity and mortality using the organ-absorbed dose (Gy) is recommended by the International Commission on Radiological Protection (ICRP)⁽²⁾, and it was adopted for the 15-Country Collaborative Study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry conducted by IARC^(3–5), the International Nuclear Workers Study (INWORKS)^(6–9), Mayak study⁽¹⁰⁾ and the Life Span Study of atomic bomb survivors^(11–13). In addition, the incidence data by cancer site from the Japanese National Cancer Registry⁽¹⁴⁾, which became available in 2019, are indispensable for morbidity risk analysis with the organ-absorbed dose for the J-EPISODE.

The most comprehensive previous study that reconstructed the organ-absorbed dose from the recorded dose was set up in the framework of the IARC 15-Country Collaborative Study^(3,15),

where experiments on dosimeter responses to photon exposure were performed for three types of dosimeters: the old film badge (FB), a multi-element FB and a thermoluminescence dosimeter (TLD). These types of dosimeters were used in the facilities that had participated in the IARC study from the inception of the nuclear industry until approximately 2000. These response data were useful for our study but were not sufficient, as those dosimeters have been replaced since 2000 by active personal dosimeters (hereafter called electronic personal dosimeters [EPDs]), radio-photoluminescent glass dosimeters (glass badges [GBs]) and optically stimulated luminescence dosimeters (Luminess badges [LBs]). In fact, until 2000, the dosimeters used in Japan were almost the same as those in the IARC study, so IARC study data could be used as they were. However, since 2000, the type of dosimeter has been changed, and it was necessary to collect those data again.

Investigation of the dosimeter response in a working environment requires a prior determination of the energy and geometry distribution of photon exposure. The IARC study estimated the organ dose conversion factor using the assumed photon energy

Table 1. The dosimeters selected for the study.

Type of dosimeter	Remarks
EPD	The Fuji Electric Co., Ltd. EPD-type NRG10811, which was in use at the Tokai Reprocessing Plant, JAEA, and calibrated in 2018. The measurement minimum unit: 0.01 mSv. Complied with JIS Z 4312: 2013 ⁽¹⁶⁾ based on IEC 61526: 2010 ⁽¹⁷⁾
GB ⁽¹⁸⁾	The Chiyoda Technol Co. GBs (monitor code: FS) for wide-range X _γ and β, on the basis of radiophotoluminescence phenomena. Case type G-5 with plastic clip. The measurement minimum unit: 0.01 mSv.* Complied with JIS Z 4345: 2017 ⁽¹⁹⁾ based on IEC 62387: 2012 ⁽²⁰⁾
LB ⁽²¹⁾	The Nagase-Landaure, Ltd. optically stimulated luminescence dosimeters, called 'LB SG type' for wide-range X _γ and β radiation. For the body trunk, with a plastic clip. The measurement minimum unit: 0.01 mSv.* Complied with JIS Z 4345: 2017 ⁽¹⁹⁾ based on IEC 62387: 2012 ⁽²⁰⁾

*While readings were rounded to one decimal place in the reports on measurement, the reference values with two digits after the decimal point were used for the study.

distribution and geometry distribution, based on the judgement of experts at nuclear facilities around the world. Taking into consideration this assumption, the dosimeter response data under combinations of a specific photon energy: N-150 (mean energy: 119 keV), N-250 (207 keV) and ¹³⁷Cs (662 keV), and a specific geometry (antero-posterior [AP] geometry and isotropic [ISO] geometry) were determined in the present study in the same way as they had been in the IARC study, but for an EPD, GB and LB. These data were then used to calculate the results for the personal dosimeter response in a working environment with an average photon energy distribution and geometry distribution experienced by Japanese nuclear workers.

The aim of this paper was to describe the dosimeter response determined by experiments conducted by the Radiation Effects Association at the calibration laboratories of the Japan Atomic Energy Agency (JAEA). The experiments examined three types of dosimeter: EPD, GB and LB in the same way of the IARC study. The organ-absorbed dose for nuclear industry workers was reconstructed from information obtained about the response of each dosimeter to photon radiation under a combination of energy ranges (100–300 keV and 300–3000 keV) and geometries (AP and ISO), where exposure in the rotational (ROT) geometry was considered negligible.

MATERIALS AND METHODS

The method of the study followed the IARC study method. The goal was not to obtain a dosimeter response in a lab but to obtain it in an actual workplace. The response of personal dosimeter to AP, ROT and ISO exposures on the human body was compared with the dose delivered by calculation simulation. For this reason, an experiment was performed using a device that irradiated an

anthropomorphic phantom while rotating it to simulate ROT and ISO.

Dosimeters

For each type of dosimeter—EPD, GB and LB—a specific dosimeter was selected for the study, as listed in Table 1^(16–21). They all complied with Japanese standards^(16,19) based on international standards^(17,20), indicating that the type test was completed. Although there is no performance specification for discrete incident angles over 75°, it is unnecessary in phantom-rotating irradiation experiments, as mentioned before.

Irradiation apparatus

Experiments were carried out at two calibration laboratories: the Facility of Radiation Standards (FRS) and the Instrument Calibration Facility (ICF) in JAEA, as described in detail elsewhere^(22,23). The FRS had ISO (International Standards Organization) X-ray narrow spectra series N-150 (tube voltage 150 kV, tube current 25.0 mA and mean energy 119 keV) and N-250 (250 kV, 15.5 mA and 207 keV)⁽²⁴⁾ and the ICF had a ¹³⁷Cs source with nominal radioactivity of 1.85 TBq.

Simulation of working conditions

In the nuclear facilities under study, the workers would have been exposed to different irradiation geometries. The IARC study categorized facilities into two types: nuclear power plants (NPPs) and mixed activities (MA) facilities. The distribution of photon energy and geometry exposed in the working environment were then estimated as presented in Table 2^(3,15,25).

DOSEMETER RESPONSE: JAPANESE NUCLEAR WORKERS

Table 2. Estimated percentage of the average dose from different photon energies and different geometries of exposure by nuclear facility type.

Nuclear facility type	Percentage of dose received from different energy photons (keV)			Percentage of dose received in different geometry		
	0-100	100-300	300-3000	AP	Isotropic	Rotational
NPPs						
Average dose (%)	0	10	90	50	50	0
MA facilities						
Average dose (%)	0	20	80	50	50	0

Reference: Table 4 of Thierry-Chef⁽³⁾.

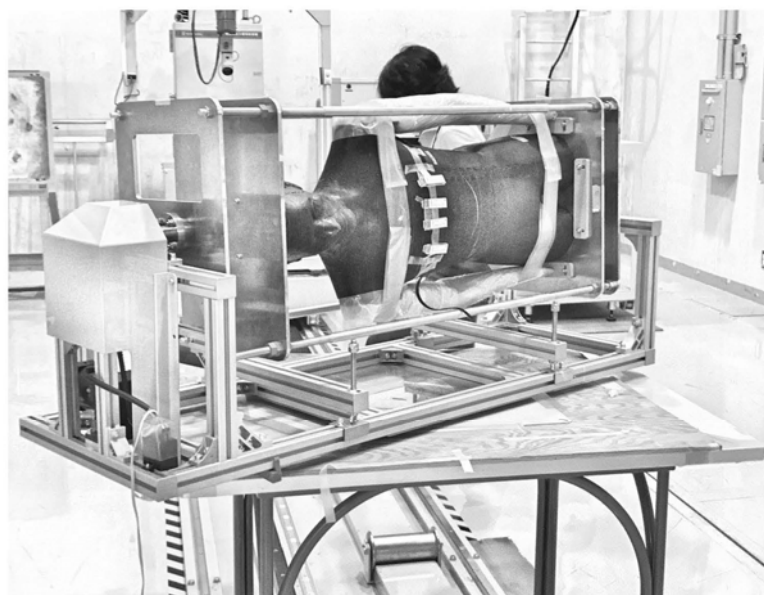


Figure 1. Device to rotate the RANDO phantom. The motor and gear case on the left. The turntable is located between the table and the device.

On average, in the NPPs, 10% of the dose was thought to be due to photon energies ranging from 100 to 300 keV and 90% from photon energies ranging from 300 to 3000 keV, with the average geometry being 50% in the AP geometry and 50% in the ISO geometry. Exposures in rotational geometry were considered negligible.

The results for the MA facilities indicated that 20% of the average dose was from photon energies ranging from 100 to 300 keV and 80% from photon energies ranging from 300 to 3000 keV. The

predominant geometry of exposure was 50% in AP geometry and 50% in ISO geometry, on average.

Phantoms and supporting device

The dosimeter response had to be assessed for both AP and ISO geometries. The body of the worker was simulated using two types of phantom. One was the slab phantom, which is a reference widely used for dosimeter calibration. It consisted of a water tank

with polymethyl methacrylate walls (outer dimensions: $30 \times 30 \times 15$ cm in depth).

The other was the anthropomorphic Alderson RANDO phantom⁽²⁶⁾. Both arms of the CIRS ATOM[®] phantom were attached, because an anthropomorphic phantom with arms was consistent with the phantom model used for computer simulation in ICRP Publ. 74⁽²⁷⁾ or ICRP Publ. 116⁽²⁸⁾. In addition, the effect of having both arms attached was verified by conducting a response test using the phantom with both arms removed.

A supporting device was constructed to rotate the anthropomorphic phantom in a horizontal position, around the body axis at a constant speed (45 s per rotation), as described by Tsujimura (2016)⁽²³⁾. This device was fixed on a turntable and allowed the experimenter to change the angle between the source and rotation axis (Figure 1). The rotation center of the turntable was at the position of the 16th slice of the RANDO phantom; that is, the beam central axis from the source and the phantom rotation axis always intersected at the position of the 16th slice.

Definition of dosimeter response

Before the RANDO phantom experiment, it was confirmed that the dosimeters used had displayed a response of 1.21 mSv per mGy under the standard calibration condition with the ¹³⁷Cs source at 662 keV in the AP geometry. A calibration factor was obtained to correct individual differences in the sensitivities of dosimeters and systematic deviation of calibration among different dosimeters. The water slab surface was placed 3.5 m from the center of the reference source, and four personal dosimeters were taped around the center of the slab surface (Figures 2 and 3). For the EPDs, calibration factors were obtained for each dosimeter by placing and testing four EPDs in the experiment. For the GBs and LBs, which are passive dosimeters and whose quality of the element per lot was considered uniform, four samples from the same lot were tested, and the average of the readings were used for the computation of the calibration factor.

The calibration factor (mSv/mSv) was defined as an inverse ratio between reading and the reference $H_p(10)$ of 2.54 mSv. The dose rate of the air kerma on the surface of the water phantom was 10.5 mGy per h, the irradiation time was 720 s and the reference irradiation dose was 2.10 mGy. It was converted to $H_p(10)$ of 2.54 mSv using the conversion coefficient of 1.21 mSv per mGy, $H_p(10)$ per air kerma, which was interpolated from Table A.24 in ICRP Publ. 74⁽²⁷⁾.

The dosimeter response (mSv/mGy) was defined by the following:

$$\frac{\text{Reading (mSv)} \times \text{Calibration factor (mSv/mSv)}}{\text{Reference dose (mGy)}}$$

Adequate precision was ensured by simultaneously irradiating four dosimeters of each type on the phantom. The average of the dosimeter response obtained for the reading of each dosimeter was taken as the average dosimeter response under each irradiation condition.

AP geometry on the anthropomorphic phantom

The supporting device was installed so that the phantom rotation axis was 3.5 m from the center of the source. For AP irradiation, the rotation device was stationary, with the phantom facing straight toward the source. The dose of 3.38 m at the position of the phantom surface was used as a reference air kerma.

For each type of dosimeter and each source, the four holders were attached to the phantom and irradiated at a fixed angle of 90° to the beam central axis. On the RANDO phantom, dosimeters were placed on the 16th slice of the phantom, which corresponded to the position of the left pocket of the work clothing usually worn in most nuclear facilities in the study. Since the EPD had a large package case, two of the four EPDs were placed 15 cm apart at the position of the 16th slice, and the other two EPDs were placed upside down (Figure 4). The exposure dose for each irradiation test was evaluated by calculating the increment dose value from the readings each time.

Isotropic geometry on the anthropomorphic phantom

The large proportion of the dose exposure in isotropic (ISO) geometry, as estimated by the IARC study, required that the dosimeter response be assessed in ISO geometry. The ISO geometry was simulated by rotating the phantom and changing the angle between the rotation axis and the source (Figure 5).

Four angles (zenith angles 30, 60, 120 and 150°) were studied to simulate ISO irradiation by combining the results obtained from the rotational (ROT) geometry of the exposure (zenith angle 90°).

A zenith angle of the 30° represents the weighted average of the area limited by 0 and 45°, the 60° angle was the weighted average of the area limited by 45 and 75° and the 90° angle was the weighted average of the area limited by 75 and 105°. Similarly, the 120 and 150° angles were the weighted average of the areas between 105 and 180°.

The response of the ISO geometry of exposure was obtained by integrating the results for rotation at each angle (integrating the differential cross section over the solid angle). The weight for each result was determined by the corresponding area. The response of the ISO geometry of exposure B_{ISO} was given by

$$B_{ISO} = 0.146 \times B_{ROT(30^\circ)} + 0.224 \times B_{ROT(60^\circ)} + 0.259 \times B_{ROT(90^\circ)} + 0.224 \times B_{ROT(120^\circ)} + 0.146 \times B_{ROT(150^\circ)}$$

with $B_{ROT(\theta)}$ being the response at zenith angle of θ .

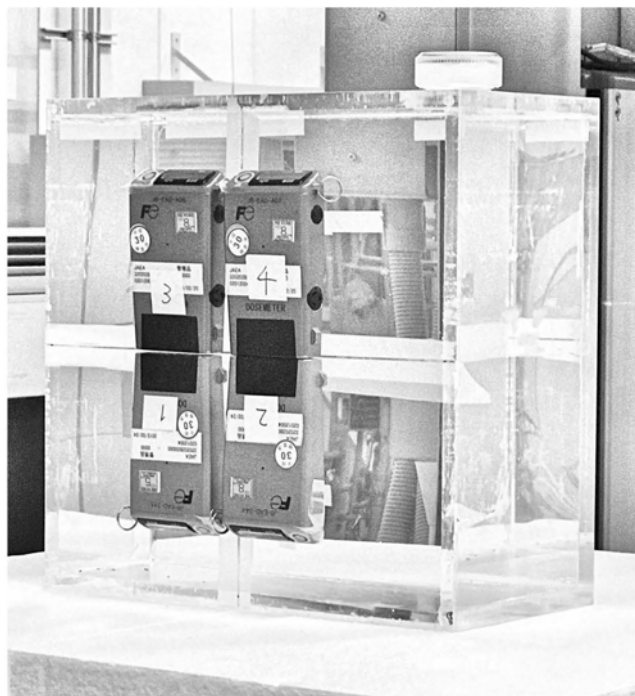


Figure 2. Position of the EPDs on the slab phantom.

For each source and each angle, the dosimeters were irradiated during an integer number of rotations. This number was determined based on the motor speed and the duration required to obtain an approximately 1-mGy air kerma from each source, as shown in Table 3.

The dose at the 3.5-m phantom rotation axis was taken as the reference air kerma. The supporting device was fixed at 3.5 m from the source for the rotation axis. Because rotation was performed at angles toward the source, the distance between the source and the dosimeter was not exactly 3.5 m during the rotation. However, since the number of rotations was an integer, this resulted in an equal opportunity for the distance to become longer than 3.5 m and to become shorter, indicating no problem in applying the dose rate of 3.5 m.

Measurement errors

In addition to the mean value of the dosimeter response, the standard deviation (SD) was calculated

to estimate the uncertainty K under the assumption of lognormal distribution for the variable of dosimeter response B for each type of dosimeter, each category and each dosimetry.

$$K = \exp(1.96 \times SD)$$

RESULTS

Calibration test before the RANDO phantom experiment

The calibration factor obtained with the ^{137}Cs source at 662 keV in AP irradiation was calculated as the ratio between the reference $H_p(10)$ dose of 2.54 mSv and the dosimeter reading. The individual dosimeter readings of the subsequent irradiation test were multiplied by the calibration factors. The value of the calibration factors was 1.01–1.04, that is almost equal to unity. It was confirmed that the dosimeters used almost displayed 1.21 mSv per mGy under the standard calibration condition.

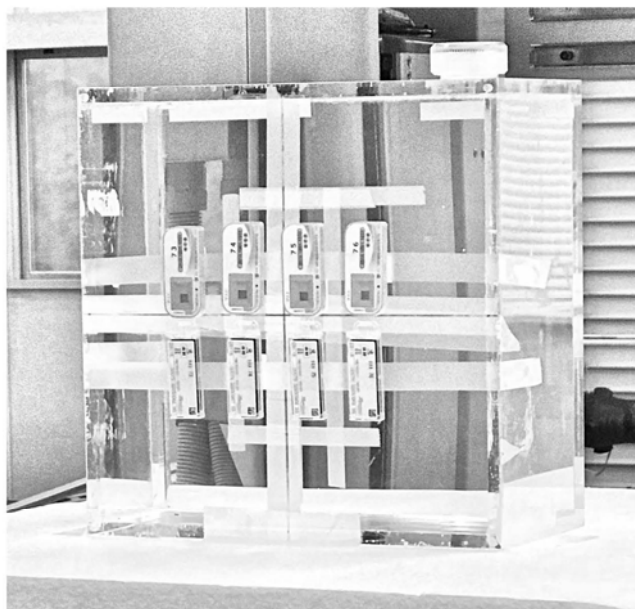


Figure 3. Position of the GBs (upper) and LBs (lower) on the slab phantom.

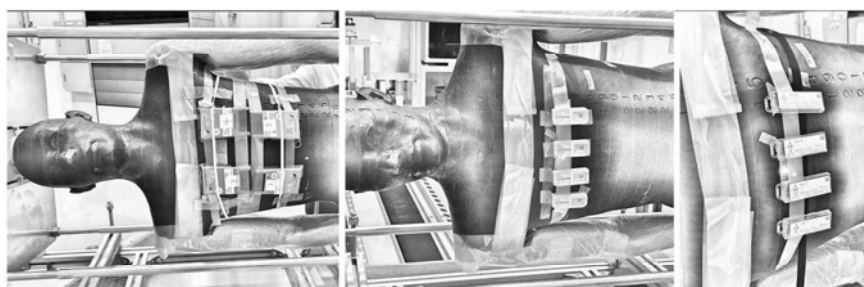


Figure 4. Position of the dosimeters on the RANDO phantom (EPDs, GBs and LBs, from left to right).

Mean response on the RANDO phantom in specific conditions

Table 4 shows the mean response and uncertainty for each type of dosimeter irradiated on the RANDO phantom at each of the three energies and three geometries of exposure.

In summary, the dosimeter responses shown in Table 4 according to dosimeter type (EPD, GB and LB), energy and geometry indicate the following.

- (1) For AP irradiation at 662 keV, the response was about 1.2 mSv per mGy for all dosimeter types, showing that the response of AP geometry on the RANDO phantom was not much different from AP geometry on the slab phantom, which was used practically for calibration. A lower energy gave a larger response value. However, in comparison with the values of $H_p(10, 0^\circ)/K_a$ interpolated from Table A.24 in ICRP Publ. 74⁽²⁷⁾, the relative response to $H_p(10)$ per air

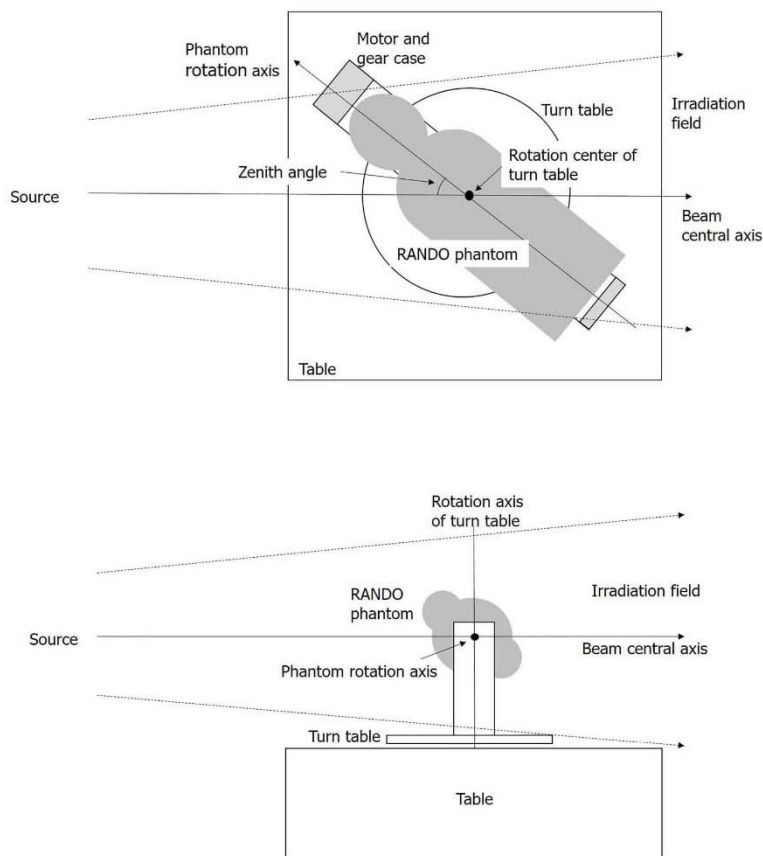


Figure 5. Simulation of isotropic irradiation.

- kerma at 119 keV was 0.79 for EPD, 0.84 for GB and 1.13 for LB, which were within the range allowed by the standards.
- (2) The ISO response value was about 0.8–0.9 mSv per mGy at 662 keV (EPD 0.82, GB 0.86 and LB 0.89). The difference in response due to energy was smaller for the ISO geometry than for the AP geometry. For instance, the value of response for LB at 119 keV in ISO geometry was 1.14 mSv per mGy, which is 28% larger than the value of 0.89 at 662 keV, while the response value of 1.93 for LB at 119 keV in AP geometry was 66% larger than the value of 1.19 at 662 keV.
 - (3) The response values were smaller for ISO than for AP for all dosimeter types and energies. In particular, a lower energy gave a larger difference for the AP. At 119 keV, the response values in ISO (EPD 0.77, GB 0.79 and LB 1.14) were smaller than those in AP; EPD was 44% smaller, GB 46% and LB 42%, respectively.
 - (4) For LB at 662 keV, the response value of 0.96 for ROT (90°) was larger than that for the oblique geometry ROT (θ); it was 0.88 for ROT (60°) and 0.87 for ROT (120°). The EPD and GB did not show such tendencies.
 - (5) The response values for ROT (θ) showed no major differences for $\theta = 30\text{--}120^\circ$ regardless of

Table 3. Irradiation conditions of the dosimeter response experiments by energy and geometry.

Narrow beam series/quality of dose		N-150	N-250	^{137}Cs
Mean energy measured		119 keV	207 keV	662 keV
Dose rate of air kerma	AP (3.38 m)	27.6 mGy per h	7.88 mGy per h	11.3 mGy per h
	ROT (3.5 m)	25.7 mGy per h	7.33 mGy per h	10.5 mGy per h
Duration	AP	315 s	990 s	720 s
	ROT	180 s	445 s	360 s
		(4 rotations)	(11 rotations)	(8 rotations)
Reference air kerma	AP (3.38 m)	2.41 mGy	2.17 mGy	2.26 mGy
	ROT (3.5 m)	1.28 mGy	0.91 mGy	1.05 mGy

ROT: Rotational geometry

the energy. For instance, the value of ROT (θ) was 0.87–0.89 mSv per mGy for GB when θ being between 30 and 120°, but it decreased to 0.79 when θ was 150°. The response of ROT (150°) might be affected by the shielding effect of the waist.

Mean response in a working environment

The personal dosimeter response in a working environment with the average photon energy distribution and geometry distribution experienced by Japanese nuclear workers is shown in Table 5. According to the IARC study⁽³⁾, the dosimeter response in the 100–300 keV range was considered to be represented by the response at 119 and 207 keV and was computed as the weighted average (each ratio 25:75%) of each result. In addition, the dosimeter response in the 300–3000 keV range was considered to be represented by a point at 662 keV.

According to Table 5, the mean dosimeter response (mSv/mGy) in the working environment was close to 1 for both the NPP and the MA facility for each type of dosimeter.

Measurement error in dosimetry

For the EPD, GB and LB, the minimum unit of measurement was 0.01 mSv, and the rounding error was 0.005 mSv. The measurement error for a dosimeter was defined as the SD of the individual deviation rates from the mean readings. This value was 1.1% for the EPD, 2.0% for the GB and 3.5% for the LB.

The error was considered to arise due to the measurement error of the dosimeter and due to the measurement method, such as the differences in the inclination of the phantom surface depending on the dosimeter attachment position and the differences in distance between the phantom rotation axis and the dosimeter.

No effect was noted for background radiation. The evaluation value for the personal dosimeter used as a control to confirm background radiation was

below the detection limit for the GB and 0 mSv for the LB.

DISCUSSION

Differences from IARC study

The experiment on the dosimeter response was conducted essentially as described by the IARC study^(3,15). Some details differed as shown in Table 6, but they did not affect the comparability of the experimental results.

Since the IARC study included the old type of dosimeters used in the 1940s or 1950s, the $H_p(10)$ was adopted as a common quantity. For this reason, $H_p(10)$ assessed/ $H_p(10)$ delivered (mSv/mSv) was used as a definition of the dosimeter response to correspond to various dose concepts and units.

The distance from the source, the reference dose in ROT geometry and the difference with/without both arms of the phantom had no effect on the dose response value measured in the assumed working environment.

The distance between the source and the phantom was set to 2 m in the IARC study, but it was set to 3.5 m in the present study so that the whole phantom was included in the irradiation field, taking into account the opening angle of the conical collimator of the X-ray irradiator and ^{137}Cs gamma-ray irradiator.

The AP geometry defined by ICRP assumes an ideal field of exposure to a parallel beam from a planar source. Conversely, the irradiation apparatus used in the experiment was a divergent radiation beam from a point source. When comparing the responses measured in the ROT geometry at different energies (119, 207 and 662 keV) and the distances from the source (2, 3, 4 and 5 m) to those calculated with collimated beams, the degree of deviation was larger at the lower energy and at the shorter distance. At a distance of 3.5 m, the deviation was 1–2% at 662 keV and 2–3% at 119 keV, revealing a negligible difference when compared with the parallel beam response.

DOSEMETER RESPONSE: JAPANESE NUCLEAR WORKERS

Table 4. Response of dosimeters irradiated on a phantom at three radiation energies (119, 208 and 662 keV) in AP and isotropic geometries of exposure.

Dosimeter type	Geometry	Mean response (B) (mSv/mGy)			Uncertainty (K)		
		119 keV	207 keV	662 keV	119 keV	207 keV	662 keV
EPD	AP	1.38	1.35	1.20	1.010	1.008	1.000
	ROT (30°)	0.84	0.99	0.87	1.021	1.008	1.031
	ROT (60°)	0.83	0.97	0.86	1.021	1.027	1.008
	ROT (90°)	0.83	0.97	0.87	1.011	1.015	1.014
	ROT (120°)	0.78	0.92	0.83	1.018	1.029	1.015
	ROT (150°)	0.51	0.69	0.64	1.039	1.041	1.022
	ISO	0.77	0.92	0.82	1.009	1.011	1.008
GB	AP	1.47	1.30	1.21	1.046	1.035	1.021
	ROT (30°)	0.65	0.84	0.87	1.056	1.059	1.072
	ROT (60°)	0.80	0.89	0.87	1.014	1.037	1.036
	ROT (90°)	0.83	0.92	0.88	1.040	1.017	1.015
	ROT (120°)	0.82	0.90	0.89	1.059	1.021	1.009
	ROT (150°)	0.80	0.79	0.79	1.058	1.023	1.020
	ISO	0.79	0.88	0.86	1.020	1.014	1.014
LB	AP	1.98	1.55	1.19	1.049	1.062	1.079
	ROT (30°)	1.15	1.01	0.90	1.055	1.065	1.097
	ROT (60°)	1.14	1.03	0.88	1.127	1.064	1.066
	ROT (90°)	1.17	1.08	0.96	1.046	1.017	1.060
	ROT (120°)	1.16	1.07	0.87	1.042	1.083	1.034
	ROT (150°)	1.09	0.90	0.80	1.128	1.021	1.094
	ISO	1.14	1.03	0.89	1.037	1.025	1.029

AP: antero-posterior geometry; ISO: isotropic geometry; ROT: rotational geometry.

Notes: (1) Uncertainty K of the dosimeter response at a certain energy and geometry category was obtained by the following equation, where SD is the standard deviation of the logarithm of each response estimate.

$$K = \exp(1.96 \times \text{SD})$$

Hence, the 95% confidence interval of the mean response B was expressed as $(B/K, B \times K)$ using the uncertainty of K . (2) K_{ISO} , uncertainty in ISO geometry, was defined as follows using $K_{\text{ROT}(\theta)}$, the uncertainty of the dosimeter response of each ROT (θ), as well as the corresponding weight.

$$K_{\text{ISO}} = \exp(1.96 \times \sqrt{0.146^2 \times K_{\text{ROT}(30^\circ)}^2 + 0.224^2 \times K_{\text{ROT}(60^\circ)}^2 + 0.259^2 \times K_{\text{ROT}(90^\circ)}^2 + 0.224^2 \times K_{\text{ROT}(120^\circ)}^2 + 0.146^2 \times K_{\text{ROT}(150^\circ)}^2})$$

(3) The results for the EPD were obtained from only two dosimeters placed at the position of the 16th slice in the present study. The gap of evaluation values between these two EPDs and the other two diverged more than 30% at the zenith angles of 30 and 150° in the energy 100–300 keV due to the differences in the attachment position and the inclination of phantom surface. The EPD used in the experiment had a battery at the bottom, which might have yielded a smaller response to the beam when irradiated from below.

Table 5. Dosimeter response and uncertainty by dosimeter type and nuclear facility type.

Dosimeter type	Response (B) (mSv per mGy)		Uncertainty (K)	
	NPP	MA	NPP	MA
EPD	1.00	1.01	1.004	1.003
GB	1.02	1.02	1.011	1.011
LB	1.06	1.08	1.037	1.033

Notes: Dosimeter response B and uncertainty K by facility type were estimated using the values of B and K determined by the energy in the AP and isotropic (ISO) geometry in Table 4, as well as the corresponding weights.

We irradiated the dosimeters with 1 mGy in the ROT geometry, whereas IARC study irradiated with 5 mGy. In working conditions, exposures would be far below these levels. These irradiations were considered sufficient to obtain accurate results and to minimize the uncertainty.

Table 6. Differences in the experiments between the present study and the IARC study.

	The present study	The IARC study
Type of dosimeter	EPD, GB and LB	Old FB, Multi-element FB and TLD
Common quantity	Air kerma	$H_p(10)$
Definition and unit of dosimeter response	$H_p(10)$ /air kerma; mSv/mGy;	$H_p(10)$ assessed/ $H_p(10)$ delivered; mSv/mSv
Distance between the source and the phantom	3.5 m	2.0 m
Reference air kerma delivered in ROT (θ) geometry	About 1 mGy	About 5 mGy
Arms of RANDO phantom	Attached	Not attached

In the experiment, the dosimeter response test was conducted with both arms attached to the RANDO phantom. Comparison of the dosimeter response in the presence and absence of both arms under the same irradiation condition (662 keV in ROT [90°] geometry, for the EPD) showed that the total response was 0.83 mSv per mGy with both arms and 0.84 without both arms. Although slight, a shielding effect by wearing both arms was recognized.

Limitations of the experiment

The personal dosimeters investigated in this study have been used in Japan since around 2000 and were not covered in the IARC study. The original type of dosimeter, which is supposedly representative of those used in the period of interest, is no longer produced, so the type in current use was studied in this experiment. However, as seen in Table 5, the difference in dosimeter response between dosimeter types is small, so dosimeter selection for the experiment did not appear to affect the mean dosimeter response in the assumed working environment.

Data from IARC study

The IARC study examined 10 historical dosimeters. The experimental results were described in Table 3 of Thierry-Chef⁽¹⁵⁾, as well as in the Web annex Table 4 of Thierry-Chef⁽³⁾. We referred to the first table because it had more significant digits. In order to compare the results of the IARC dosimeter responses and those of the present study, the values were converted to dosimeter response per air kerma. In the IARC study, the values in Table 3⁽¹⁵⁾ were obtained from 'readings per air kerma' divided by 'conversion coefficient from air kerma to $H_p(10)$ ' from Table 1⁽¹⁵⁾, as the following:

$$[\text{Readings/air kerma}] / [H_p(10)/\text{air kerma}] = [\text{Readings}/H_p(10)]$$

Therefore, the values in Table 3⁽¹⁵⁾ could be converted to dosimeter response per air kerma by multiplying by the 'conversion coefficient from air kerma to $H_p(10)$ ' from Table 1⁽¹⁵⁾.

The X-ray quality and beam code of the IARC study were the same as in our study: ISO 4037-1/N-150 and N-250⁽²⁴⁾, with a mean energy of 118 and 208 keV, respectively, and the differences of the mean energy were negligible.

The dosimeter types used in Japan before 2000 were roughly categorized into three types in IARC study as the old FB, multi-element FB and TLD. Reconstruction of the organ-absorbed dose in the J-EPISTUDY study required selection of the most suitable of the 10 dosimeter types used in the IARC study.

FBs previously used in Japan

We classified the FBs used in Japan into two types. The first type was the JIS II type FB for gamma-ray based on JIS Z 4302 (1957)⁽²⁵⁾, one of the oldest FB used in Japan, mainly in research organizations. This type was regarded as an old FB in the IARC study. The average dosimeter response of FR-1, US-2, UK-2 and UK-5 was assigned to the old FB in Japan.

The other FB type was the multi-element FB of the IARC study and corresponded to the average of the UK-9, US-8 and FR-6 (Table 7).

TLDs used in Japan

A rigorous comparison of the TLD badges used in Japan with those used in the IARC study was difficult in terms of TLD materials and packaging cases. This was because the TLD badge used in Japan was a Panasonic UD-808 consisting of a resin filter, equivalent to 1000 mg per cm², that covered a Li₂B₄O₇(Cu) element. In the IARC study, the UK-10 and FR-9 were selected as the LiF-based TLDs dominant in the West, while the US-22 (Panasonic UD-802) was selected as a combination of a CaSO₄(Tm) element and a lead filter. Strictly speaking, although US-22 made by Panasonic used at the Savannah River Site in the USA differed slightly from the model numbers and filters of the TLDs used in Japan, the similarity in the basic dosimeter structure indicated that the data

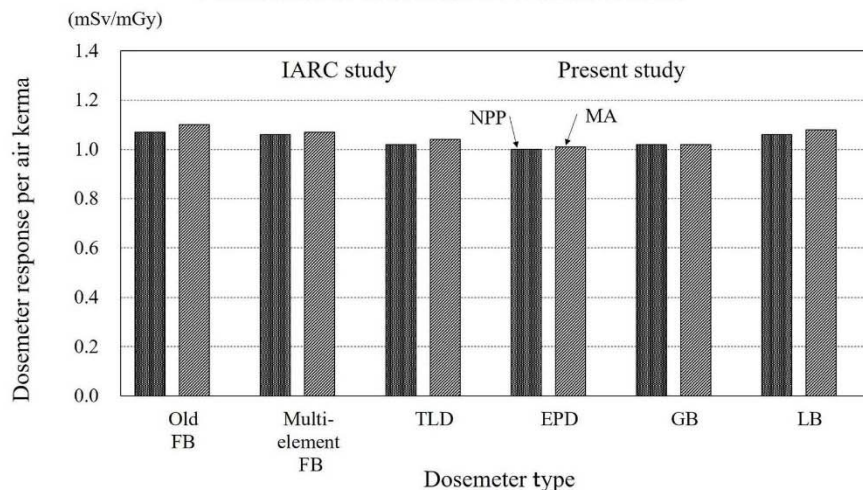


Figure 6. Dosemeter response per air kerma in the work environment experienced by nuclear workers by dosimeter type and nuclear facility type.

Table 7. Dosemeter types used in Japan and the corresponding data from the IARC study.

Dosemeter types used in Japan		Corresponding data for the dosimeter response in the IARC study
Old FB	JIS II type FB for γ -ray	Average of FR-1, US-2, UK-2 and UK-5
Multi-element FB	Other FBs	Average of UK-9, US-8, and FR-6
TLD	Panasonic product	US-22

for the US-22 were most suitable for comparison with the TLD used in Japan.

Dosemeter response by dosimeter type used in Japan

Figure 6 shows the dosimeter responses from the IARC study and the present study, and the results are consistent. The results of the three types on the left in Figure 6 are from the IARC study, and those on the right are the experimental results from the present study.

Applicability of the IARC study assumption to Japanese nuclear workers

The assumption of the IARC study on the energy and geometry distribution of photons is fundamental information in estimating organ-absorbed dose from the reading of personal dosimeters. The results of the literature survey in the 1980s found

that there were investigations for which electric power companies actually measured energy and geometry distributions at NPPs. The evidence of the working environments of Japanese workers in NPP demonstrated the appropriateness of applying the IARC study assumption to reconstructing organ-absorbed dose in J-EPISODE, as described elsewhere⁽³⁰⁾.

CONCLUSIONS

The data for the dosimeter response in a working environment are fundamental information when reconstructing the organ-absorbed dose. The dosimeter response experiment conducted in the present study for EPD, GB and LB dosimeters was intended to rectify the lack of response data for these dosimeters. The dosimeter response data obtained for the dosimeter types in current use in Japan were consistent with those reported in the IARC study

for the old FB, multi-element FB and TLD. These data will be utilized for J-EPISODE in reconstructing organ-absorbed doses. The findings will also be useful for any nuclear workers cohorts using the new types of dosimeters.

FUNDING

This work was funded by the Nuclear Regulation Authority, Japan.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflicts of interest associated with this manuscript.

REFERENCES

- Kudo, S., Yoshimoto, K., Furuta, H., Inoue, K., Fukushima, M. and Kasagi, F. *Occupational radiation exposure and leukemia mortality among nuclear workers in Japan: J-EPISODE, 1991–2010*. *Jpn. J. Health Phys.* **53**, 146–153 (2018).
- International Commission on Radiological Protection. *The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection, ICRP publication 103*. *Ann. ICRP* **37**(2/4), pp. 251–253 (2007).
- Thierry-Chef, I. et al. *The 15-country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: study of errors in dosimetry*. *Radiat. Res.* **167**, 380–395 (2007).
- Vrijheid, M., Cardis, E., Blettner, M., Gilbert, E., Hakama, M., Hill, C., Howe, G., Kaldor, J., Muirhead, C. R. and Veress, K. *The 15-country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: Design, epidemiological methods and descriptive results*. *Radiat. Res.* **167**, 361–379 (2007).
- Cardis, E., Vrijheid, M., Blettner, M., Gilbert, E., Hakama, M., Hill, C., Howe, G., Kaldor, J., Muirhead, C. R. and Veress, K. *The 15-country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: Estimates of radiation-related cancer risks*. *Radiat. Res.* **167**, 396–416 (2007).
- Thierry-Chef, I. et al. *Dose estimation for a study of nuclear workers in France, the United Kingdom and the United States of America: methods for the International Nuclear Workers Study (INWORKS)*. *Radiat. Res.* **183**, 632–642 (2015).
- Hamra, G. B. et al. *Cohort profile: the International Nuclear Workers Study (INWORKS)*. *Int. J. Epidemiol.* **45**, 693–699 (2016).
- Richardson, D. B. et al. *Risk of cancer from occupational exposure to ionizing radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS)*. *BMJ* **351**, h5359 (2015).
- Leuraud, K. et al. *Ionizing radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study*. *Lancet Haematol.* **2**, e276–e281 (2015).
- Gilbert, E., Sokolnikov, M. E., Preston, D. L., Schonfeld, S. J., Schadilov, A. E., Vasilenko, E. K. and Koshunmikhova, N. A. *Lung cancer risks from plutonium: an updated analysis of data from the Mayak worker cohort*. *Radiat. Res.* **179**, 332–342 (2013).
- Preston, D. L., Ron, E., Tokuoka, S., Funamoto, S., Nishi, N., Soda, M., Mabuchi, K. and Kodama, K. *Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998*. *Radiat. Res.* **168**, 1–64 (2007).
- Ozasa, K., Shimizu, Y., Suyama, A., Kasagi, F., Midori, S., Grant, E. J., Sakata, R., Sugiyama, H. and Kodama, K. *Studies of the mortality of atomic bomb survivors, report 14, 1950–2003: an overview of cancer and non-cancer diseases*. *Radiat. Res.* **177**, 229–243 (2012).
- Grant, E. J. et al. *Solid cancer incidence among the life span study of atomic bomb survivors: 1958–2009*. *Radiat. Res.* **187**, 513–537 (2017).
- Matsuda, T. and Sobue, T. *Recent trends in population-based cancer registries in Japan: the act on promotion of cancer registries and drastic changes in the historical registry*. *Int. J. Clin. Oncol.* **20**, 11–20 (2015).
- Thierry-Chef, I., Pernicka, F., Marshall, M., Cardis, E. and Andreo, P. *Study of a selection of 10 historical types of dosimeter: variation of the response to $H_p(10)$ with photon energy and geometry of exposure*. *Radiat. Prot. Dosim.* **102**, 101–113 (2002).
- Japanese Standards Association. *Direct reading personal dose equivalent meters for X, gamma, beta and neutron radiations JIS Z 4312: 2013 (in Japanese)*. (Japanese Industrial Standard) (2013).
- IEC 61526. *Radiation protection instrumentation—Measurement of personal dose equivalents $H_p(10)$ and $H_p(0.07)$ for X, gamma, neutron and beta radiations—Direct reading personal dose equivalent meters (2010)*.
- Maki, D., Ube, M., Nagashima, Y., Shinozaki, W., Ueno, S., Koguchi, Y. and Takeuchi, N. *Development of the new glass badge*. *Radiat. Prot. Dosim.* **171**, 337–345 (2016).
- Japanese Standards Association. *Passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation. JIS Z 4345: 2017 (in Japanese)*. (Japanese Industrial Standard) (2017).
- IEC 62387. *Radiation protection instrumentation—Passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation (2012)*.
- Luminess Badge Service, Nagase Landauer, Ltd. Available from: <https://www.nagase-landauer.co.jp/luminess/index.html> (29 January 2020, date last accessed).
- Kowatari, M., Yoshitomi, H., Nishino, S., Tanimura, Y., Ohishi, T. and Yoshizawa, M. *The Facility of Radiation Standards in Japan Atomic Energy Agency, present status and its research works on dosimetry*. Vol. 3. (IRPA 14 Proceedings) pp. 1230–1238 (2016).
- Tsujimura, N., Yoshida, T., Hoshi, K. and Momose, T. *Performance of Panasonic ZP-1460 electronic personal dosimeter under exposure conditions likely to be found at Fukushima Daiichi nuclear power plant. Proceedings of international symposium on radiation detectors and their uses (ISR2016)*. *JPS Conf. Proc.* **11**, 070008 (2016).
- ISO. *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining*

DOSEMETER RESPONSE: JAPANESE NUCLEAR WORKERS

- their response as a function of photon energy—Part I: Radiation characteristics and production methods. ISO. 4031-1 (2019).
25. Thierry-Chef, I., Cardis, E., Ciampi, A., Delacroix, D., Marshall, M., Amoros, E. and Bermann, F. *A method to assess predominant energies of exposure in a nuclear research Centre-Saclay (France)*. Radiat. Prot. Dosim. **94**, 215–225 (2001).
 26. Hörnlund, M. and Bernhardsson, C. Organ dose determined using a RANDO phantom for different radionuclide depositions and photon energies. In: Proceedings of International Conference “Medical Physics in the Baltic States”, Lithuania. (2013).
 27. International Commission on Radiological Protection. *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation*. ICRP Publication 74. Ann. ICRP **26**(3/4), 24–26 (1996).
 28. International Commission on Radiological Protection. *Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures*. ICRP Publication 116. Ann. ICRP **40**(2/5), 45–47 (2010).
 29. Japanese Standards Association. Film badge for γ -ray and hard X-ray. JIS Z 4302:2002 (in Japanese). (Japanese Industrial Standard) (2002).
 30. Radiation Effects Association. Report on organ dose reconstruction study meeting (in Japanese, but abstract available in English). Available from <http://www.rea.or.jp/> 29 January 2020, date last accessed (2019).

- (3) Estimation of Photon Energy and Direction Distributions at Japanese Nuclear Power Plants Based on Literature Survey for J-EPISODE Study. *Radiat Prot Dosimetry*. 190, 372-391, 2020.

Radiation Protection Dosimetry (2020), Vol. 190, No. 4, pp. 372-391
Advance Access publication 3 September 2020

doi:10.1093/rpd/ncaa111

ESTIMATION OF PHOTON ENERGY AND DIRECTION DISTRIBUTIONS AT JAPANESE NUCLEAR POWER PLANTS BASED ON LITERATURE SURVEY FOR J-EPISODE STUDY

Hiroshige Furuta, Akemi Nishide, Shin'ichi Kudo and Shin Saigusa
Institute of Radiation Epidemiology, Radiation Effects Association, 1-9-16 Kaji-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0044 Japan

*Corresponding author: furuta@rea.or.jp

Received 30 March 2020; revised 5 July 2020; editorial decision 23 July 2020; accepted 23 July 2020

In order to reconstruct organ-absorbed dose from recorded dose for risk estimation in nuclear worker cohort, the preceding study of the International Agency for Research on Cancer (IARC) 15-Country Collaborative Study estimated the organ dose conversion factor from the recorded dose of $H_p(10)$ under the assumption that on average, in the nuclear power plants (NPPs), 10% of the dose received by workers was due to photon energies ranging from 100 to 300 keV and 90% from photon energies ranging from 300 to 3000 keV, with the average geometry being 50% in the antero-posterior geometry and 50% in the isotropic geometry. Similar examination was conducted at the Japanese Epidemiological Study on Low-Dose Radiation Effects (J-EPISODE). Literature survey disclosed that Japanese electric power companies had jointly conducted the research on energy distribution and incidence direction distribution of gamma rays in working environments during periodical inspection and maintenance as well as during operation in the 1980s. The analysis of the survey results on photon energy and geometry distribution of Japanese NPPs demonstrated appropriateness in applying the IARC study assumption for nuclear workers in Japan and reconstructing organ-absorbed dose in the J-EPISODE. These results in Japan also provide strong evidence to support the robustness and generality of the IARC study assumption, which was estimated based on the judgment of experts at nuclear facilities around the world.

INTRODUCTION

Although the concept of effective dose E and its operational definition of personal equivalent dose $H_p(10)$ are nowadays widely used for radiological protection purpose, the International Commission on Radiological Protection (ICRP) has recommended that effective dose should not be used for epidemiological studies⁽¹⁾. It is desirable to use organ-absorbed dose for the evaluation of cancer morbidity and mortality in epidemiological cohort studies. Organ-absorbed dose was adopted for the International Agency for Research on Cancer (IARC) 15-Country Collaborative Study⁽²⁻⁴⁾, the International Nuclear Workers Study (INWORKS)⁽⁵⁻⁸⁾, Mayak study⁽⁹⁾ and the Life Span Study (LSS) of atomic bomb survivors⁽¹⁰⁻¹²⁾.

The IARC study assumption was that on average, in the nuclear power plants (NPPs), 10% of the dose received by nuclear workers was due to photon energies ranging from 100 to 300 keV and 90% from photon energies ranging from 300 to 3000 keV, and in the mixed activities (MA) facilities such as research and development organizations and fuel processing factories, 20% from photon energies ranging from 100 to 300 keV and 80% from photon energies ranging from 300 to 3000 keV, with the average geometry being 50% in the antero-posterior (AP) geometry and 50% in the isotropic (ISO) geometry for NPPs and MA facilities⁽²⁾, as shown in Table 1.

Here, the exposure by nuclear workers was regarded to be derived from photon at energy level of 0.1–3 MeV and in AP geometry and ISO geometry, meaning that photon with energy over 3 MeV, exposure in rotational (ROT) geometry, neutron exposure and intakes of nuclides were thought to be negligible in the estimation of organ-absorbed dose. The IARC study determined the above-mentioned exposure condition basically based on the judgment of experts at nuclear facilities around the world, taking into consideration some prior experimental studies⁽²⁾.

Thierry-Chef *et al.* (2001)⁽¹³⁾ described a method to assess the proportion of the dose from photons in three energy ranges (<100, 100–300, ≥300 keV) using the responses under filters of a multi-element dosimeter and stated that the experimental, simulated data provided a good estimate of the proportion of dose from photons below 100 keV, the most critical for dosimeter response. Then the method was applied to personnel readings in one facility of Saclay, France, confirming the experts' estimation. Thus, the expert's estimation results of the IARC study assumption were supported by the experiment at Saclay. The authors⁽¹³⁾ also described that the results of the Saclay analyses were consistent with estimates of dose distribution with energy in the workplace carried out in the UK and USA.

© The Author(s) 2020. Published by Oxford University Press.
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

PHOTON EXPOSURE RECEIVED BY NPP WORKERS IN JAPAN

Table 1. The assumption of the IARC study; estimated percentage of average doses in nuclear power plants and 'MA' facilities from different photon energies and different geometries of exposure.

Items	Percentage of dose received from different energy photons (keV)			Percentage of dose received in different geometries		
	0–100	100–300	300–3000	AP	Isotropic	Rotational
Nuclear power plants						
Average dose (%)	0	10	90	50	50	0
Range of dose (minimum–maximum) (%)	0–1	5–20	80–100	10–80	20–90	0
Uncertainty on average and ranges (%)	±5 (2 SD)			±10 (2 SD)		
'MA' facilities						
Average dose (%)	0	20	80	50	50	0

SD, standard deviation.

Note: Cited Table 4 in Thierry-Chef (2007)⁽²⁾ and reproduced by the author.

Japanese epidemiological study

The Japanese Epidemiological Study on Low-Dose Radiation Effects (J-EPISODE), funded by the Nuclear Regulation Authority (NRA), formerly by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), has been conducted by the Radiation Effects Association (REA) since 1990 and analyzed health effects in association with radiation exposure evaluated in personal dose equivalent $H_p(10)$ ⁽¹⁴⁾. However, in the above-mentioned, internationally evaluated radiation epidemiological studies, organ-absorbed dose is mainly used for the evaluation of morbidity and mortality due to cancer. In order for J-EPISODE to be compared and evaluated internationally in the future, it is indispensable to use organ-absorbed dose. In addition, cancer incidence data since 2016 have become available by the National Cancer Registry⁽¹⁵⁾. These conditions have enhanced J-EPISODE reconstruct organ-absorbed dose, and the Expert Committee on Reconstruction of Organ Dose was set up within REA during fiscal year 2017–2018.

Aim of the study

The reconstruction of organ dose necessitates information on the photon energy and geometry distribution of the exposed population. The IARC study assumption seemed to be consistent with common knowledge based on the practical experience of radiation control staff in Japan. However, no document clearly stating working environment compatible with the IARC study assumption had been available in the public domain.

In order to verify the validity of the IARC study assumption also in Japan, a literature survey was conducted to review documents on working environment, such as photon energy distribution and geometry distribution of Japan's NPPs, which was also pointed

out by the Expert Committee. The present paper describes the results of a literature survey on energy distribution and geometry distribution in Japan's NPPs and a supplementary analysis of the data. Reflecting the above result of literature survey, conversion factor from dosimeter reading to air kerma for nuclear worker for further conversion from air kerma to organ-absorbed dose was constructed in the preceding paper of Furuta *et al.* (2020)⁽¹⁶⁾.

MATERIALS AND METHODS

The estimation of energy distribution and direction distribution of gamma ray was an important research item because it was the basic information for the evaluation of the personal dosimeter characteristics under actual working environment and the dose equivalent distribution in the body.

Features of Japanese NPP

The reactor type of NPPs operated in Japan was a boiling water reactor (BWR) or a pressurized water reactor (PWR). There were 50 operating NPPs as of March 2013. Of these, 26 plants were BWR and 24 were PWR⁽¹⁷⁾. In Japan, periodical inspection by the successive regulatory authorities was implemented within at most 13 months from the previous one, and in many cases, nuclear operator conducted refueling, disassembling, maintenance and improvement work for dose reduction during shutdown period. Oumi *et al.* (2011)⁽¹⁸⁾ reported that the operation of the upper limit of regulation about 13 months and periodical inspection outage about 80 days were carried out in Japan and that the exposure dose during the periodical inspection usually contributed to 80–90% of the total annual dose. The authors⁽¹⁸⁾ also described the features of Japan's working environment in comparison with foreign countries, especially

Downloaded from https://academic.oup.com/rpd/article/190/4/372/5901021 by guest on 13 January 2021

Table 2. Gamma-ray air dose rate and mean energy during PIM.

(1) PWR					
Survey spot	Location	Exposure rate (mR/H)			Mean gamma-ray energy (keV)
		Ionization NaI ^a chamber			
Spent fuel pit	A/B-5FL	2.4	A	1.6	653
Waste liquid evaporator room	A/B-3FL	14	A	17.4	1225
CVCS non-regeneration cooler room	A/B-3FL	14	A	8.6	851
RHR cooler room	A/B-2FL	8	A	2.5	836
RHR piping area A	A/B-1FL	26	A	5.2	920
RHR piping area B	A/B-1FL	14	A	3.2	845
RHR pump room	A/B-BFL	22	A	19.0	1113
5FL inside C/V	C/V-5FL	3.2	A	2.2	793
Loop room entrance	C/V-2FL	2.4	A	2.5	661
Beside the SG handhole	Loop room	80	D	32.7	685
Below the SG manhole	Loop room	36	B	28.7	877
Beside the SG barrier	Loop room	30	B	22.1	827
Pressurizer	Loop room	18	D	12.7	780
Reactor cooler pump	Loop room	30	D	4.0	767
(2) BWR					
Survey spot	Location	Exposure rate (mR/H)			Mean gamma-ray energy (keV)
		Ionization NaI ^a chamber			
Condensate water filter room	T/B-1FL	0.0	C	0.05	859
Condensate demineralizer room	T/B-1FL	1.5	C	1.6	771
Radioactive waste disposal pump room	RW/B-1FL	2.5	A	4.3	992
Radioactive waste disposal tank room	RW/B-1FL	8.0	A	9.7	1097
Fuel inspection area	R/B-5FL	1.0	A	1.0	921
5FL inside R/B	R/B-5FL	4.0	A	2.6	382
Reactor well inside	R/B-5FL	9.0	A	8.3	1017
CRD repair room B	R/B-4FL	3.6	C	3.6	866
FPC heat exchanger room	R/B-3FL	4.8	A	5.4	807
CUW heat exchanger room	R/B-2FL	4.0	A	0.9	633
CUW auxiliary pump room	R/B-2FL	3.5	A	2.6	875
Around RHR pump	R/B-BFL	6.0	A	1.7	902
Equipment drain sump pump	R/B-BFL	3.5	A	4.4	989
Around feed-water nozzle	PCV-3FL	3.0	A	2.3	734
Around SRV A	PCV-2FL	18.0	A	15.9	1008
Around RHR/CUW piping	PCV-2FL	90.0	C	83.4	860
Around PLR ring header	PCV-2FL	25.0	C	11.5	736
Around PLR moter	PCV-1FL	9.0	A	6.9	1032
Around MSIV	PCV-1FL	6.0	A	4.7	879
Machine loading hatch front	PCV-1FL	11.0	A	7.3	1053
Pedestal inside	PCV-BFL	20.0	A	16.2	1312
Around floor drain sump pump	PCV-BFL	8.0	A	4.2	950

CVCS, chemical and volume control system; RHR, residual heat removal system; SG, steam generator; CRD, control rod drive; FPC, fuel pool cooling and cleanup system; CUW, reactor water cleanup system; SRV, safety relief valve; PLR, primary loop recirculation system; MSIV, main steam isolation valve.

^aA: 3-inch spherical NaI, B: 2-inch spherical NaI, C: 1-inch spherical NaI, D: 1-inch diameter cylindrical NaI.

Note: Reproduced and translated by the author based on Figure 3.4.1 and Table 3.4.3 in REA (2019)⁽²¹⁾. The original was Figure A and Table 1 in EPCJCR (1983)⁽¹⁹⁾.

the USA, as follows: the duration of plant operation was shorter, the duration of inspection activities was longer and the number of workers during outage was

larger. In this connection, the term of 'periodical inspection' was hereafter referred to as 'periodical inspection and maintenance (PIM)'.

Table 3. Gamma-ray direction during PIM.

Survey spot	Mean gamma-ray energy (keV)	Direction component (%) in Northern hemisphere								
		1. Top	2. Top front	3. Top left	4. Top back	5. Top right	6. Front	7. Left	8. Back	9. Right
(1) PWR										
Spent fuel pit	653	0	0	0	0	0	17	47	36	0
Waste liquid evaporator room	1225	0	18	0	0	0	53	15	14	0
CVCS non-regeneration cooler room	851	0	0	0	0	24	63	3	0	10
RHR cooler room	836	37	11	11	9	0	2	26	4	0
RHR piping area A	920	10	0	0	2	16	6	6	44	5
RHR piping area B	845	19	9	9	25	0	34	0	3	0
RHR pump room	1113	10	21	8	0	1	51	9	0	0
SFL inside CV	793	13	31	16	3	0	23	13	0	0
Loop room entrance	661	15	31	9	7	0	29	0	2	7
Beside the SG handhole	685	0	2	0	0	0	98	0	0	0
Below the SG manhole	877	78	4	7	0	3	1	7	0	1
Beside the SG barrier	827	2	1	5	0	14	9	45	1	26
Pressurizer	780	0	50	4	15	0	9	1	21	0
Reactor cooler pump	767	—	—	—	—	—	—	—	—	—
(2) BWR										
Survey spot	Mean gamma-ray energy (keV)	Direction component (%) in northern hemisphere								
Condensate water filter room	859	0	0	0	0	0	—	0	0	—
Condensate demineralizer room	771	0	2	76	0	0	0	6	13	2
Waste disposal pump room	992	0	13	11	0	15	59	0	0	2
Waste disposal tank room	1097	0	60	5	1	4	21	6	0	4
Fuel inspection area	921	0	0	0	0	0	—	0	0	—
Reactor well inside	382	4	15	0	0	0	22	22	37	0
CRD repair room B	1017	4	1	0	0	23	45	11	3	12
FPC heat exchanger room	866	0	0	0	0	0	0	31	4	65
CUW heat exchanger room	807	13	17	3	13	10	31	0	5	9
CUW auxiliary pump room	633	0	53	5	0	9	22	0	9	1
Around RHR pump	875	42	0	0	20	3	0	0	20	14
Equipment drain sump pump	989	12	0	10	19	19	0	10	29	0
Around feed-water nozzle	734	8	4	16	0	16	12	44	0	0
Around SRV A	1008	2	0	17	4	4	5	47	22	0
Around RHR/CUW piping	860	0	6	2	0	0	56	0	7	28
Around PLR ring header	736	2	0	5	0	2	11	81	0	0
Around PLR motor	1032	11	2	25	2	10	36	14	0	0
Around MSIV	879	0	25	4	0	0	69	1	0	1
Machine loading hatch front	1053	42	5	20	0	14	1	5	0	13
Pedestal inside	1312	0	59	0	23	12	2	3	0	3

(Continued)

Table 3. Gamma-ray direction during PIM.

Survey spot	Mean gamma-ray energy (keV)	Direction component (%) in northern hemisphere								
		1. Top	2. Top front	3. Top left	4. Top back	5. Top right	6. Front	7. Left	8. Back	9. Right
Around floor drain sump pump	950	10	20	0	0	0	61	9	0	0

Lead shield container cap

Slit number

Notes: (1) Reproduced and translated by the author based on Table 3.4.3 in REA (2019)⁽²¹⁾. The original was Figure A and Table 1 in EPCJCR (1983)⁽¹⁹⁾. (2) Unit of length: mm, ϕ : diameter, R: radius in the diagram at bottom left. The number in the direction component columns corresponded to that in the diagram at bottom right. (3) The values in bold represented the largest in respective rows.

Disclosure of survey result

Regarding literature survey results, the 10 major electric power companies agreed to disclose the report of electric power companies' joint commissioned research (hereafter called EPCJCR)^(19, 20) to REA and allowed REA to list the report as a reference and also to reproduce several tables and figures in the Expert Committee's report, which was compiled in 2019, submitted as one of deliverables to NRA and then placed in the public domain⁽²¹⁾, in order to enable a sharing of the basic information of working environment with stakeholders, such as researchers, government officials and radiation control staff of NPP.

Literature survey

During a literature survey, it was revealed that an energy spectrum analysis of the light-water reactor in Japan was actively conducted in the 1980s, when introduction of the concept of effective dose equivalent recommended by ICRP Publ. 26⁽²²⁾ was considered. Since drastic changes were expected in the field of radiation protection at that time, it was considered that, in anticipation of the changes, proactive research activities had been carried out, which seemed also aggressive from a modern perspective.

While conducting the literature survey, we arrived at the publicly accessible report of the Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) (1985)⁽²³⁾, which was a compilation of the result of technical studies on measurement method of direction distribution and energy distribution of radiation. With that as a clue, it was found that the 10 major electric power companies jointly conducted measurements on gamma-ray energy distribution and incident direction distribution at several NPPs in the 1980s, using the measurement method described in CRIEPI⁽²³⁾. One of the EPCJCR was the survey during PIM⁽¹⁹⁾, the other was the survey during operation⁽²⁰⁾. These two survey reports were disclosed to REA upon request.

However, the energy distribution during PIM described in EPCJCR (1983)⁽¹⁹⁾ was found only in the form of line charts of pulse-height count (PHC) data, the result of which could not be compared directly with the IARC study assumption. As a result of inquiring at each electric power company about the existence of investigation data on energy distribution during PIM, it was found that Tokyo Electric Power Company (TEPCO) holdings conserved the result of TEPCO commissioned survey during PIM⁽²⁴⁾, which REA also applied for disclosure.

EPCJCR survey method during PIM

Literature of EPCJCR (1983)⁽¹⁹⁾ investigated the energy distribution and incident direction

distribution of gamma rays in the working area during PIM, exposure control during which was very important. As for the purpose of the survey⁽¹⁹⁾, the report described as follows: In line with the external exposure control of various workers at NPP, it was necessary to make an evaluation based on the determination of radiation field under the working environment. In 1981, the basic study on the related information and the preliminary test at the site of PWR were conducted, and in 1982, on-site evaluation of external exposure dose using the measurement apparatus was conducted on the main working areas during PIM at representative plants of PWR and BWR.

The work area investigated in the survey⁽¹⁹⁾ was 13 spots in PWR and 22 spots in BWR. In PWR, six spots in the reactor auxiliary building (A/B), two spots in the containment vessel (C/V) and five spots in the loop room were selected. In addition, in BWR, two spots in the turbine building (T/B), two spots in the radioactive waste disposal building (RW/B), nine spots in the reactor building (R/B) and nine spots in the primary containment vessel (PCV) were included in the survey. The report⁽¹⁹⁾ stated that the selected survey spots were well-represented because almost all the major works during PIM were performed there, or in the similar work environment.

Measurement apparatus for energy distribution and direction distribution

In order to measure the energy distribution and direction distribution of gamma rays at NPP where the air dose rate spread widely, a measurement apparatus using NaI detector was manufactured^(19, 20, 23, 24). The apparatus was structured to be shielded by a lead material in order to reduce the influence of the background radiation, and a lead head portion with openable slits was provided on it so that gamma rays from a specific direction could be separated and measured. The slits of the lead container were provided at a total of nine positions in the northern hemisphere, at the north pole, at four equal division points on the 45° north circumference, and at four equal division points on the equator. Figure 1 is an example of a measurement apparatus using 2-inch spherical NaI⁽²³⁾.

Regarding direction distribution, the spectral difference was measured by opening and closing the lead shielding plug of each slit. As for energy distribution, a PHC was measured without lead shield container cap on NaI detector. Then, the dose rate, the mean energy and the energy distribution of gamma rays could be calculated from this PHC data by applying the response matrix method. The NaI detector of 3-inch spherical type was mainly used, but in the high dose rate field, 2-inch spherical type or 1-inch

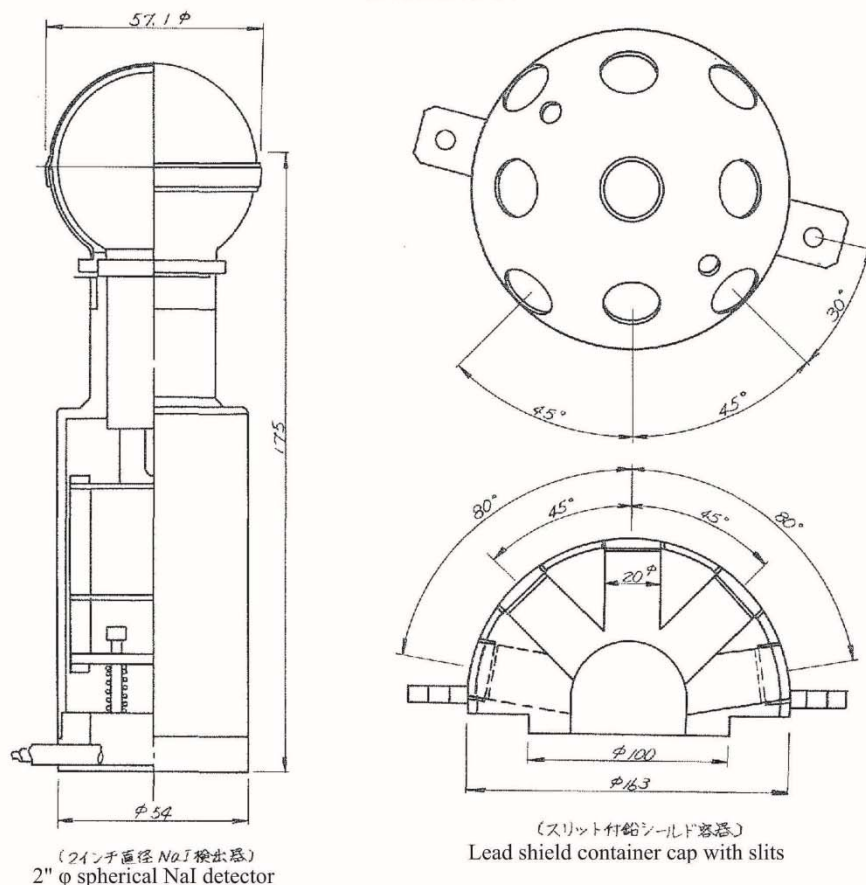


Figure 1: Example of gamma-ray direction measurement apparatus; NaI detector and lead shield container cap with slits. Cited Figure 1 in CRIEPI (1985)⁽²³⁾. Unit of length: mm, φ: diameter

spherical type was also used. For spectrum measurement, a portable pulse-height analyzer was employed⁽²³⁾.

TEPCO survey method during PIM

TEPCO conducted the survey on the radiation distribution of various working areas at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station (BWR) in 1983–1984⁽²⁴⁾. The survey work area was the whole area of Unit Three and the fifth floor of the R/B in Unit One.

The measurement method of the energy distribution of the gamma rays was the same as that of EPCJCR (1983)⁽¹⁹⁾. In addition to the PHC data, the analysis results of the gamma-ray intensity and the dose distribution by energy were listed in detail in tables and figures for each survey spot. Table of the cumulative dose contribution rate by energy at 100 keV band from 0 keV to 3000 keV was available for each survey spot. Thus, the value in the 200–300 keV band of the table indicated the proportion of dose <300 keV.

EPCJCR survey method during operation

The EPCJCR (1986)⁽²⁰⁾ implemented in 1984–1986 was intended to determine the dose rate distribution and energy distribution of high energy gamma rays in NPP during operation, when the radiation distribution status was regarded as different from that during PIM. Gamma-ray energy distribution was measured at a total of 19 spots in the selected two plants from BWR, and at a total of nine spots in the selected two plants from PWR. Although PWR survey measured inside C/V, BWR survey did not cover inside C/V because inert gas filled during operation. Direction distribution of gamma rays was not investigated.

RESULTS**EPCJCR survey result during PIM**

Literature of EPCJCR (1983)⁽¹⁹⁾ described as follows: The main radiation type in each work area was gamma rays, and the exposure rate was at least 0.02 mR/H (ambient dose equivalent rate: 0.2 μ Sv/h) and at most 90 mR/H (0.9 mSv/h), as shown in Table 2. It was below 40 mR/H (0.4 mSv/h) in most work areas^(19, 21).

Although the main radiation source during PIM was ⁶⁰Co (gamma-ray energies: 1.17 MeV and 1.33 MeV), the report⁽¹⁹⁾ stated that there were many work areas where the mean gamma-ray energy was in the range of 800–1000 keV due to the influence of scattering components, etc.

Geometry distribution during PIM

According to Table 3, the actual working environment was not recognized as simple source distribution such as single point source. In many cases, the source direction in which the maintenance worker mainly exposed to radiation was found to be front or upper front.

Table 3 shows the results when the lead shield container with slits was left standing in the main source direction. In other words, it meant the exposure geometry when the worker was standing stationary at the maintenance spot toward the main source. The mean sum value of the column of '6. Front' and '2. Top front' of Table 3, which was assumed as AP geometry, was approximately 41% (interquartile range (IQR): 10–70%)¹. The result supported that the proportion of AP was set up to an average of 50% and range 10–80% in IARC study assumption.

1 One survey spot of reactor cooler pump in PWR and two spots of condensate water filter room and fuel inspection area in BWR were excluded because of no description of the results.

In addition to this, a video shooting of the actual worker's motion during main jobs was implemented to analyze the worker's ROT movements⁽¹⁹⁾. The survey stated that the worker's movements showed the individuality such as right-handedness, fatigue, etc., and the rotation component was large even when the work was done in a specific direction. According to Table 4, the direction component of 'Front' by ROT motion analysis averaged 37%. It was found that even though the main source was located stationary in front of the measurement apparatus, the ROT movement of the actual worker contributed to increase the ratio of ROT or ISO in the exposure geometry. Considering that there were components of top front, top left, top back and top right in Table 2, it was appropriate for the worker's exposure geometry to be regarded as ISO rather than ROT.

Energy distribution during PIM

Figure 2 displays an example of gamma-ray energy spectrum measurement for each of four representative working areas of PWR (upper) and BWR (lower) during PIM. The X-axis of each chart was gamma-ray energy (MeV) from 0 to 1.6 MeV, whereas the measurement was performed up to 3 MeV. The Y-axis was the common logarithm of the counting rate (PWR: counts/40 sec, BWR: counts/80 sec). That is, the figure represented gamma-ray PHC from NaI detector. However, neither a table nor a chart showing the energy distribution of the dose was included in the report⁽¹⁹⁾.

Trial estimation of energy distribution from PHC data

Although analysis method of PHC data were described in the Appendix in the present paper, the result was described here. Reading the line chart of counting rate of gamma rays at an interval of 0.1 MeV, the gamma-ray energy distribution under a certain assumption was calculated as shown in Table 5. The proportion of dose of 0.1–0.3 MeV was a mean of 11% of eight survey spots (IQR: 4–13%, mean for PWR: 9%, BWR: 14%) and was found to be within the range expected by the IARC study assumption.

TEPCO survey result on gamma-ray energy distribution during PIM

Figure 3 shows the energy distribution at the 32 measurement spots in Unit Three, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station except for the operation of PCV head off. The dose ratio of gamma rays with energy <300 keV showed the mean of 7.2% (IQR: 4.7–8.7%), and at most 18%, which were within the range envisioned by the IARC study assumption.

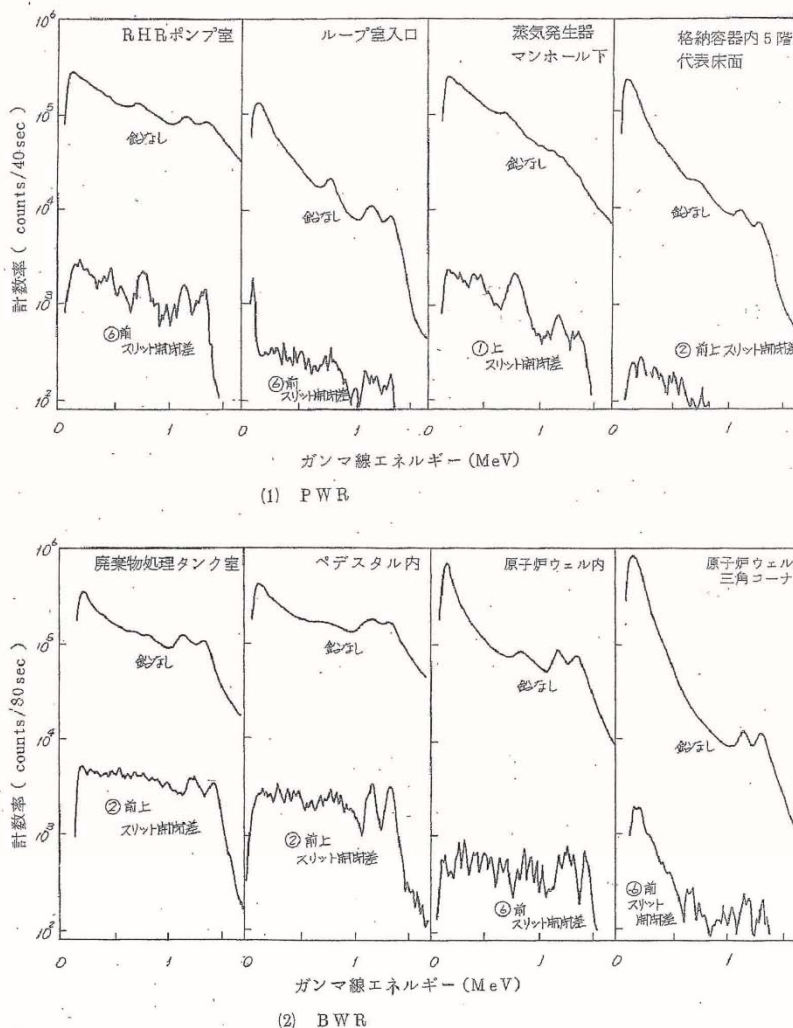


Figure 2: PHC of photon energy during PIM at PWR and BWR plant. Cited Figure 3.4.5 in REA (2019)⁽²¹⁾. The original was Figure 4 in EPCJCR (1983)⁽¹⁹⁾, written in Japanese. The caption was 'Figure 4. Examples of measurement of gamma-ray energy spectrum'. The X-axis was 'Gamma-rays energy (MeV)', representing 0–1.5 MeV. The upper four line-charts were at PWR and the lower four at BWR. The Y-axis scale represented from 10^2 to 10^6 . The unit of Y-axis at PWR was 'Count rate (counts/40 sec)' and that at BWR was 'Count rate (counts/80 sec)'. Each chart had two lines, the upper of which was the measurement result without lead shield container cap on NaI detector, and the lower of which was the measurement result with the lead shielding plug of a specific slit being open. The survey spots at PWR were, from the left, RHR pump room, primary coolant loop room entrance, below the SG manhole and the fifth floor inside C/V, whereas those at BWR were radioactive waste disposal tank room, pedestal inside, reactor well inside and triangle corner in the reactor well.

Downloaded from https://academic.oup.com/rpd/article/190/4/372/5901021 by guest on 13 January 2021

Table 4. Rotational movement analysis of real workers by video shooting during PIM.

Survey spot	Work description	Direction component when the phantom installation direction was front (%)				Direction component when the phantom installation direction was from (%)			
		Front (0°)	Front right (45°)	Right (90°)	Back right (135°)	Back (180°)	Back left (225°)	Left (270°)	Front left (315°)
PWR									
Spent fuel pit	New fuel transportation	24	18	18	7	6	3	17	3
RHR pump room	Impeller installation	32	23	14	1	0	1	6	17
5FL inside C/V	Fuel support pin replacement	49	5	8	6	5	14	7	2
Beside the SG handhole	Lid closing	15	1	3	0	0	0	41	37
Below the SG manhole	Eddy current testing	40	17	11	2	2	1	9	15
Pressurizer	Inspection	45	3	1	0	1	2	16	28
Reactor cooler pump	Inspection	34	29	23	7	3	1	0	1
BWR									
Condensate water filler room	Filter out and transportation	5	10	7	8	13	33	10	11
Condensate demineralizer room	Inspection	23	10	13	1	7	0	15	27
Fuel inspection area	Refueling	48	12	10	0	0	0	11	16
5FL inside R/B	PCV head on	36	15	2	2	4	4	11	21
Reactor well inside	Decontamination	15	9	20	10	19	7	9	6
CRD repair room	Overhaul inspection	22 ^a	15	8	7	9	9	9	16
Around SRV	Loading and assembly restoration	30 ^b	5	1	1	3	3	12	42
RHR pump room	Inspection	68	10	9	0	1	2	3	4
PLR pump	Mechanical seal replacement	84	0	0	0	1	3	2	6
Pedestal inside	CRD recovery	60	8	9	7	0	0	1	12

^aThe direction of the tank was taken as front.

^bThe reactor tangential direction was taken as front.

Note: Reproduced and translated by the author based on Table 3.4.4 in REA (2019)⁽²¹⁾. The original was Table 6 in EPCICR (1983)⁽¹⁹⁾.

Proportion of dose less than 300 keV (%)

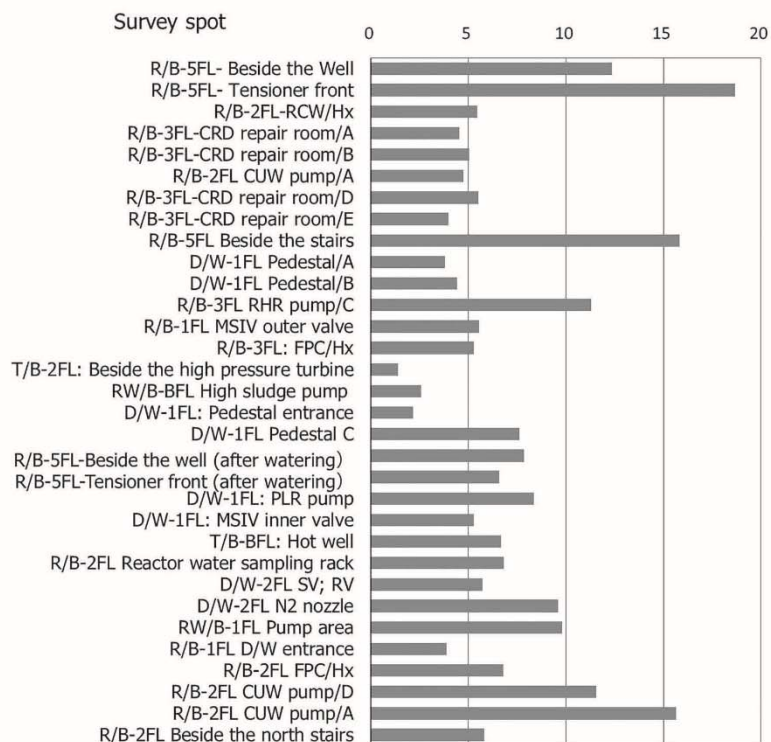


Figure 3: Gamma-ray energy distribution during PIM (TEPCO survey at Unit Three, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (BWR)). Cited Figure 3.4.7 in REA (2019)⁽²¹⁾ and translated by the author. The original data were on the tables in TEPCO (1984)⁽²⁴⁾

On the other hand, the energy distribution when opening PCV head was measured at Unit One, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. At the time of PCV head off operation, the energy distribution change of the gamma ray was expected. Making the use of high sensitivity type 3-inch height, 3-inch diameter cylindrical NaI detector, continuous measurement of energy distribution was performed. The dose ratio of <300 keV was summarized by stage when PCV head was opened, as shown in Table 6.

The dose ratio of <300 keV on the fifth floor of the R/B before opening PCV head was 13%, similar to the measurement results of Unit Three. As the opening work of the PCV head progressed, the mean energy value gradually decreased (not shown),

whereas the dose ratio of <300 keV was at most 27%. The increased percentage of low energy gamma rays along with opening PCV head seemed to be due to the gamma rays from inside the reactor being scattered at the ceiling. When the well was filled full with water after completion of the PCV head off operation, the dose ratio of <300 keV returned to the value before the PCV head was opened.

EPCJCR survey result during operation in BWR

In the BWR during operation, there was a spot where gamma rays with much higher energy than ⁶⁰Co were generated. The nuclides of ¹⁶N (half-life: 7.13 sec) and ¹⁵C (half-life: 2.4 sec) were found which emit high

PHOTON EXPOSURE RECEIVED BY NPP WORKERS IN JAPAN

Table 5. Trial estimation result of gamma-ray energy distribution during PIM.

Survey spot	Proportion of dose of 0.1–0.3 MeV (%)
PWR	
RHR pump room	3.2
Primary coolant loop room entrance	14.1
Below the SG manhole	6.0
The fifth floor inside C/V	13.2
Mean	9
BWR	
Radioactive waste disposal tank room	4.0
Pedestal inside	2.7
Reactor well inside	9.5
Triangle corner in the reactor well	38.4
Mean	14
Mean of the eight survey spots	11

Note: Cited Table 3.4.6 in REA (2019)⁽²¹⁾ and translated by the author. The estimation method was described in the Appendix in the present paper.

Table 6. Change of gamma-ray energy distribution during PCV head off (TEPCO survey) (beside the reactor well on the fifth floor in the R/B, Unit One, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (BWR)).

Stages when opening PCV head	Proportion of dose <300 keV (%)
Before PCV head opening	(Seven-spot mean) 12.5
The day before PCV head opening	7.6
Just before opening the PCV head	13.2
Lifting the PCV head in the reactor well	20.3
Putting the PCV head on the fifth floor	21.1
PCV head opened completely	27.4
Reactor well filled with water after moving the dryer	(Two-spot mean) 11.0

Note: Cited Table 3.4.8 in REA (2019)⁽²¹⁾ and translated by the author. The original data were on the tables in TEPCO (1984)⁽²⁴⁾.

energy gamma rays (¹⁶N: 6.1 MeV and ¹⁵C: 5.3 MeV) while moving along the steam flow⁽²⁰⁾. However, it was concluded that the effects of high energy gamma rays from ¹⁶N and ¹⁵C were negligible during PIM, because such nuclides disappeared shortly after shut-down due to their short half-lives and were no more produced during PIM.

Figure 4 displays the dose contribution rates by gamma-ray energy at the nine survey spots in Hamaoka Nuclear Power Station (BWR). The X-axis of each chart was gamma-ray energy (MeV), which was displayed 0–8 MeV at 0.2 MeV bands. The Y-axis represented the cumulative dose contribution rate of gamma rays above the energy at the indicated point. Therefore, assuming that the contribution rates of the 0.1 MeV point, the 0.3 MeV point and the 3 MeV point were a, b and c, respectively, the ratio of (a – b) and (b – c) meant the dose ratio of 0.1–0.3 MeV and 0.3–3 MeV.

According to the results of reading the charts, the proportion of dose of 0.1–0.3 MeV was in the range of

4 to 10% (Mean 7%), indicating that the results were within an envisioned range of IARC study.

EPCJCR survey result during operation in PWR

During the operation of PWR, high-energy gamma rays from ¹⁶N and ¹⁵C were also measured. In addition, gamma rays with energy about 8 MeV, which was higher than that of ¹⁶N, were also detected. It was considered that such gamma rays were emitted from the ⁵⁶Fe (n, γ) ⁵⁷Fe neutron capture reaction, in case that ⁵⁶Fe were contained in the reactor structural material and captured neutrons generated by fission of ²³⁵U. Therefore, such high gamma rays were observed only inside C/V and in front of its emergency air lock near the reactor⁽²⁰⁾.

Figure 5 displays the dose contribution rates by energy of gamma rays at five survey spots in Mihama Power Station (PWR). Similar to the above Figure 4 of BWR, but the X-axis was displayed from 0 to 9 MeV at 0.2 MeV bands. The estimated proportion

Downloaded from https://academic.oup.com/rpd/article/190/4/372/5901021 by guest on 13 January 2021

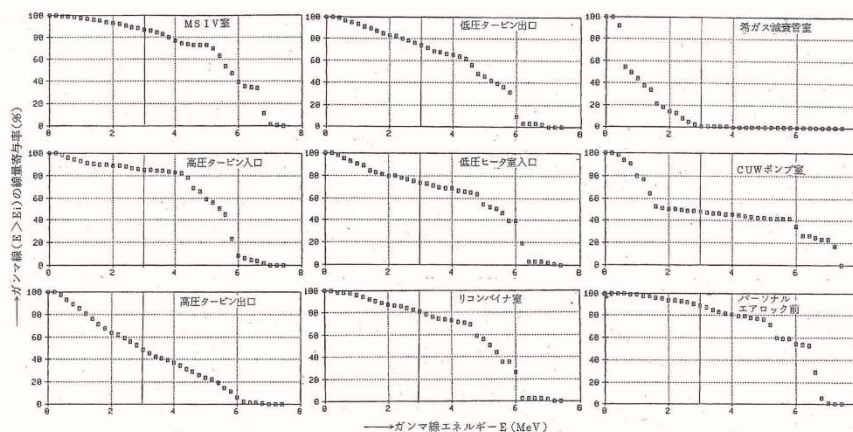


Figure 4: Gamma-ray energy distribution during operation at BWR plant. Cited Figure 3.4.9 in REA (2019)⁽²¹⁾. The original was Figure 3 in EPCJCR (1986)⁽²⁰⁾, written in Japanese. The caption was ‘Figure 3. Dose contribution rate of each energy of gamma rays at selected survey spots in Hamaoka Nuclear Power Plant (BWR)’. The X-axis was ‘Gamma-rays energy E (MeV)’ and the Y-axis was ‘Dose contribution rate of each energy of gamma rays (E > Ei); %’. The nine line-charts displayed respective dose contribution of survey spots; from upper left to right, MSIV room, low pressure turbine room exit, rare gas hold-up pipe room, high pressure turbine room entrance, low pressure heater room entrance, CUV pump room, high pressure turbine room exit, recombiner room and front of personal air lock.

Table 7. Gamma-ray direction distribution based on the EPCJCR.

Proportion of AP geometry (%)	During PIM		During operation		Assumption of IARC study
	BWR (22 spots)	PWR (13 spots)	BWR	PWR	
Mean	39	46	Not surveyed		50
IQR	4-72	16-62			—
Min—Max	0-94	5-100			10-80

Note: (1) The above figures based on the results when the lead shield container with slits was left standing in the main source direction. (2) Cited Table 3.4.11 in REA (2019)⁽²¹⁾ and translated by the author.

Table 8. Gamma-ray energy distribution based on the EPCJCR.

Proportion of dose in 0.1–0.3 MeV (%)	During PIM		During operation		Assumption of IARC study
	BWR (4 spots)	PWR (4 spots)	BWR (9 spots)	PWR (5 spots)	
Mean	14	9	7	10	10
IQR	4-17	5-13	5-8	10-11	—
Min—Max	3-38	3-14	4-10	3-15	5-20

Note: Cited Table 3.4.12 in REA (2019)⁽²¹⁾ and translated by the author.

Downloaded from https://academic.oup.com/rpd/article/190/4/372/5901021 by guest on 13 January 2021

of dose 0.1–0.3 MeV ranged from 3 to 15% (mean 10%). The result in PWR during operation was also found to be almost within an envisioned range of IARC study.

Summary

With regard to the gamma-ray incident direction distribution during PIM in Table 7, the AP component did not reach 50% with the stationary measurement apparatus. However, considering the movement of the actual worker by video shooting, the AP ratio of the exposure geometry was not considered inconsistent with the IARC study assumption.

Despite a lack of data during operation, the direction distribution during operation was understood that it was the same as those during PIM.

Table 8 summarizes the energy distribution of gamma rays at Japanese NPP⁽²¹⁾. The proportion of dose in 100–300 keV was found to be within an envisioned range of IARC study.

In the end, it was verified that the surveys were conducted to assess the energy spectrum and directions of incidence on workers and that those surveys demonstrate that both the spectrum and the direction of incidence measured are compatible with the IARC study assumption.

DISCUSSIONS

Estimation method of energy distribution

The approach for estimating energy distribution differed between Thierry-Chef (2001)⁽¹³⁾ and EPCJCR^(19, 20). The former used the differences of the responses under filters of a multi-element dosimeter, which was worn by a worker, whereas the latter used PHC data from a NaI detector, which was placed stationary at a specific working area. Despite the different approaches, it was interesting that the both resulted in almost the same ratio of energy 100–300 keV and 300–3000 keV.

Trial estimation of energy distribution from PHC data

The gamma-ray energy distribution during PIM at TEPCO whose energy distribution was not based on the trial estimation, but derived directly from the tables listed in the survey report⁽²⁴⁾ was evaluated as being within an envisioned range of IARC study. In addition, the result of the trial estimation (Table 5) was almost the same as the result of TEPCO (Figure 3). Therefore, the trial method of estimating

dose distribution by energy from PHC data was confirmed to be appropriate.

Gamma rays above 3 MeV during operation

Figures 4 and 5 show that a considerable portion of gamma rays >3 MeV was present during operation. However, since only a limited number of operators and radiation control staff entered the control area during operation, and the stay inside the control area was also in short time, the portion of exposed gamma rays >3 MeV was considered small.

Representativeness of the survey result over a long period

J-EPISODE has published analysis reports every 5 y since 1995. The fifth analysis of J-EPISODE targeted the dose data during 1957–2010, at an intermediate point of which the EPCJCR were conducted. Although the dose rate had dropped sharply in the 1980s as a result of the dose reduction measures, the reactor type, the radiation source and job description basically remained without a big change, suggesting that the survey results in the 1980s represented the whole period 1957–2010. That is, it turned out that there was appropriate in applying the energy and geometry assumption of IARC study to J-EPISODE.

CONCLUSIONS

The IARC study assumption on the energy and geometry distribution of photon exposure is fundamental information in estimating organ-absorbed dose from personal dosimeter reading. Verifying whether the IARC study assumption can be applied to Japanese workers in NPP will be crucial for the assessment of reconstructed organ-absorbed dose.

As a result of the literature survey in the 1980s, it was found that there were reports of investigation by EPCJCR where electric power companies actually measured and assessed the energy spectrum and directions of incidence on workers at the site of NPP separately during PIM and during operation. The results of EPCJCR became the evidence that the IARC study assumption was applicable for J-EPISODE. The analysis of working environment of Japanese workers in NPP demonstrated appropriateness in applying the IARC study assumption for reconstructing organ-absorbed dose in J-EPISODE. These results in Japan also provide strong evidence to support the robustness and generality of the IARC study assumption, which was estimated based on the judgment of experts at nuclear facilities around the world.

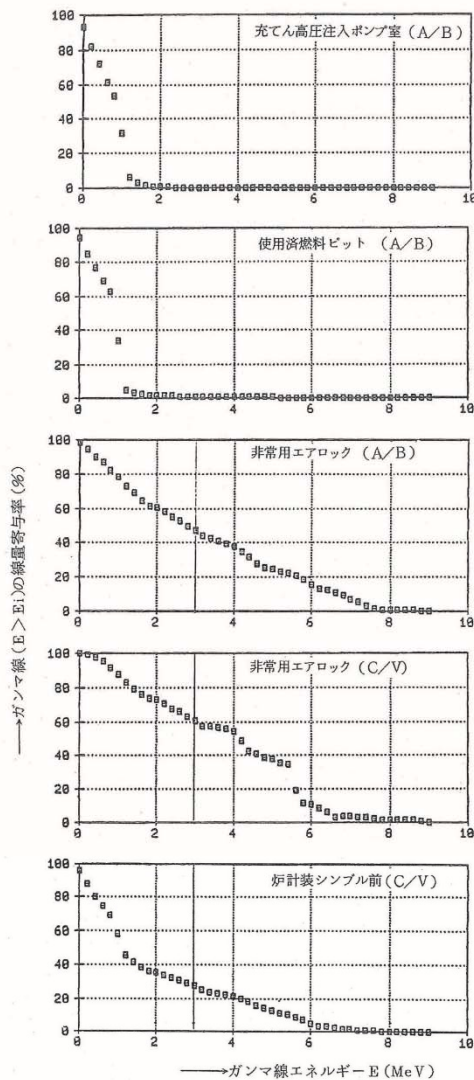


Figure 5: Gamma-ray energy distribution during operation at PWR plant. Cited Figure 3.4.10 in REA (2019)⁽²¹⁾. The original was Figure 5 in EPCJCR (1986)⁽²⁰⁾, written in Japanese. The caption was 'Figure 5. Dose contribution rate of each energy of gamma rays at selected survey spots in Mihama Power Plant (PWR)'. The X-axis was 'Gamma-rays energy E (MeV)' and the Y-axis was 'Dose contribution rate of each energy of gamma rays (E > Ei); %'. The five line-charts displayed respective dose contribution at survey spots; from upper to bottom, charging/safety injection pump room (A/B), spent fuel pit (A/B), emergency air lock (A/B), emergency air lock (C/V) and front of the in-core neutron monitoring system thimble tubes (C/V).

Downloaded from https://academic.oup.com/rpd/article/190/4/372/5901021 by guest on 13 January 2021

FUNDING

This study was funded by the Nuclear Regulation Authority, Japan.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the 10 major electric power companies in Japan for disclosing the results of the EPCJCR and permitting them to be referred in the REA's report. Without this disclosure, the present study would not hold in the first place. Mr Masami Ikai, Mr Atsuo Ito and Mr Noboru Ishizawa of REA, who all had worked at TEPCO, provided important information, based on their recall, on research period and research titles regarding the related EPCJCR. Dr Kenji Ishida, who had been in charge of conducting the EPCJCR, kindly commented on the survey method and the perspective of the survey results. Dr Norio Tsujimura of Japan Atomic Energy Agency provided guidance on a wide range of fields such as dosimetry, measurement method and interpretation of the results of the EPCJCR. Dr Michiya Sasaki of CRIEPI provided basic idea about estimating photon energy distribution from PHC data of NaI detector.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflicts of interest associated with this manuscript.

ABBREVIATIONS DEFINITIONS

A/B, auxiliary building; BWR, boiling water reactor; C/V, containment vessel; CRD, control rod drive; CUW, reactor water cleanup system; CVCS, chemical and volume control system; D/W, dry well; FPC, fuel pool cooling and cleanup system; MSIV, main steam isolation valve; PCV, primary containment vessel; PLR, primary loop recirculation system; PWR, pressurized water reactor; R/B, reactor building; RCW, reactor building closed cooling water system; RHR, residual heat removal system; RW/B, radioactive waste disposal building; SG, steam generator; SRV, safety relief valve; T/B, turbine building.

NOTE

The above list was based on the Information Portal for the Fukushima Daiichi Accident Analysis and Decommissioning Activities. Available from: https://fdada.info/en/home2/a/bbrev_top2/abbrev_search/en/ (5 July 2020, date last accessed).

REFERENCES

1. International Commission on Radiological Protection. *The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection, ICRP publication 103*. Ann. ICRP **37**(2/4), 251–253 (2007).
2. Thierry-Chef, I. *et al.* The 15-country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: study of errors in dosimetry. Radiat. Res. **167**, 380–395 (2007).
3. Vrijheid, M., Cardis, E., Blettner, M., Gilbert, E., Hakama, M., Hill, C., Howe, G., Kaldor, J., Muirhead, C. R. and Veress, K. *The 15-country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: design, epidemiological methods and descriptive results*. Radiat. Res. **167**, 361–379 (2007).
4. Cardis, E., Vrijheid, M., Blettner, M., Gilbert, E., Hakama, M., Hill, C., Howe, G., Kaldor, J., Muirhead, C. R. and Veress, K. *The 15-country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: estimates of radiation-related cancer risks*. Radiat. Res. **167**, 396–416 (2007).
5. Thierry-Chef, I. *et al.* Dose estimation for a study of nuclear workers in France, the United Kingdom and the United States of America: methods for the international nuclear workers study (INWORKS). Radiat. Res. **183**, 632–642 (2015).
6. Hamra, G. B. *et al.* Cohort profile: the international nuclear workers study (INWORKS). Int. J. Epidemiol. **45**, 693–699 (2016).
7. Richardson, D. B., Cardis, E., Daniels, R. D., Gillies, M., O'Hagan, J. A., Hamra, G. B., Haylock, R., Laurier, D., Leuraud, K., Moissonnier, M. *et al.* Risk of cancer from occupational exposure to ionizing radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). BMJ **351**, h5359 (2015).
8. Leuraud, K., Richardson, D. B., Cardis, E., Daniels, R. D., Gillies, M., O'Hagan, J. A., Hamra, G. B., Haylock, R., Laurier, D., Moissonnier, M. *et al.* Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study. Lancet Haematol. **2**, e276–e281 (2015).
9. Gilbert, E., Sokolnikov, M. E., Preston, D. L., Schonfeld, S. J., Schadilov, A. E., Vasilenko, E. K. and Koshumikova, N. A. Lung cancer risks from plutonium: an updated analysis of data from the Mayak worker cohort. Radiat. Res. **179**, 332–342 (2013).
10. Preston, D. L., Ron, E., Tokuoka, S., Funamoto, S., Nishi, N., Soda, M., Mabuchi, K. and Kodama, K. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998. Radiat. Res. **168**(1–64) (2007).
11. Ozasa, K., Shimizu, Y., Suyama, A., Kasagi, F., Midori, S., Grant, E. J., Sakata, R., Sugiyama, H. and Kodama, K. *Studies of the mortality of atomic bomb survivors, report 14, 1950–2003: an overview of cancer and noncancer diseases*. Radiat. Res. **177**, 229–243 (2012).
12. Grant, E. J. *et al.* Solid cancer incidence among the life span study of atomic bomb survivors: 1958–2009. Radiat. Res. **187**, 513–537 (2017).

13. Thierry-Chef, I., Cardis, E., Ciampi, A., Delacroix, D., Marshall, M., Amoros, E. and Bermann, F. *A method to assess predominant energies of exposure in a nuclear research centre – Saclay (France)*. *Radiat. Prot. Dosim.* **94**, 215–225 (2001).
14. Kudo, S., Yoshimoto, K., Furuta, H., Inoue, K., Fukushi, M. and Kasagi, F. *Occupational radiation exposure and leukemia mortality among nuclear workers in Japan: J-EPISODE, 1991–2010*. *Jpn. J. Health. Phys.* **53**, 146–153 (2018).
15. Matsuda, T. and Sobue, T. *Recent trends in population-based cancer registries in Japan: the act on promotion of cancer registries and drastic changes in the historical registry*. *Int. J. Clin. Oncol.* **20**, 11–20 (2015).
16. Furuta, H., Tsujimura, N., Nishide, A., Kudo, S. and Saigusa, S. *Conversion factor from dosimeter reading to air kerma for nuclear worker using anthropomorphic phantom for further conversion from air kerma to organ-absorbed dose*. *Radiat. Prot. Dosim.* **189**, 371–383 (2020).
17. Japan Nuclear Energy Safety Organization (JNES). *Operational Status of Nuclear Facilities in Japan, 2013 edition*. JNES, Tokyo, 13–19 (2013).
18. Oumi, T., Shouji, H. and Imai, T. *Dose reduction activities in Japanese nuclear power plants and dose forecast in future (in Japanese)*. *Jpn. J. Health. Phys.* **46**(2), 132–139 (2011).
19. Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI). *Study on accuracy improvement of external exposure dose assessment (Final report in Japanese)*. In: Electric Power Companies' Joint Commissioned Research (EPCJCR). (1983).
20. Inc, C. R. S. *Study on establishment of external exposure dose evaluation method (final report in Japanese)*. Electric Power Companies' Joint Commissioned Research (EPCJCR) (1986).
21. Radiation Effects Association. *Report on organ dose reconstruction study meeting (in Japanese, but abstract available in English) (2019)*. <http://www.rea.or.jp/> (5 July 2020, date last accessed).
22. International Commission on Radiological Protection. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP Publication 26*. *Ann. ICRP*, **1**(3), 3–6, 14–26 (1977).
23. Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI). *Application of in-situ monitoring method of effective dose equivalent (in Japanese)*. Energy and environment laboratory report 284060. CRIEPI, 6–13 (1985).
24. TEPCO Environmental Engineering Inc. *Study on application of external exposure dose evaluation method (final report in Japanese)*. TEPCO Commissioned survey (1984).
25. Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). *NaI (TI) scintillation spectrometer instrumental analysis (in Japanese)*. Radioactivity measurement method series No. 6 (1974).
26. International Commission on Radiological Protection. *Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation*. *ICRP publication 74*. *Ann. ICRP* **26**(3/4), 159 (1996).

Appendix. Trial estimation method of energy distribution of gamma ray from PHC of NaI detector

A case of 'below the steam generator (SG) manhole' of PWR is shown below.

(1) From the line of 'without lead shield container cap on NaI detector' at 'below the SG manhole' in Figure 2, the PHC between 0.1 and 1.6 MeV at 0.1 MeV interval was digitized as Table A1.

Considering the Compton scattering fraction in the PHC, the number of incident photons by energy, called as unfolded data or corrected count data, was estimated as follows.

(2) The counting rate of 9 (1000 counts/40 sec) at the energy band of 1.6 MeV, indicating a width of 1.5–1.6 MeV, was assumed to be derived from gamma ray of that energy band.

(3) Compton scattering fraction at lower energy bands derived from the highest energy of 1.6 MeV was firstly removed from the PHC, as the next. Figure 2 (4) of the response matrix (0–3 MeV) for 3-inch spherical NaI in the reference of CRIEPI (1985)⁽²³⁾ was used for the estimation of the Compton scattering fraction. It was assumed that the response matrix was $M(i, j)$ ($i, j = 1, 2, \dots, 30$), i represented an gamma-ray incident energy band of $i/10$ (MeV), j represented channel of energy band $j/10$ (MeV) and $M(i, j)$ indicated the PHC at channel of energy band $j/10$ (MeV) in case of gamma-ray incident with energy band of $i/10$ (MeV). The Compton scattering fraction ratio derived from gamma-ray incident of 1.6 MeV ($i = 16$) was defined as $M(16, j)/M(16, 16)$ for channel of the lower energy band j ($j = 1, 2, \dots, 15$). For each incident energy band (the i -th row), the Compton scattering fraction ratio included in the lower energy band (the j -th column) is determined as Table A2.

(4) The PHC of 9 at 1.6 MeV (Table A1) was multiplied by the Compton scattering fraction

ratio at the energy band j of the 1.6 MeV row ($i = 16$) in Table A2, followed by subtracting the multiplication value from PHC at the energy band j in Table A1.

Then, with respect to 1.5 MeV energy band, next to the highest energy band, the same process described above was performed. The steps were sequentially performed until the lowest energy band, completing the corrected count data. This process, called stripping method, was illustrated as the triangular matrix (Table A3). A solution could not be obtained because the PHC of 0.1 MeV or less disappeared for the energy of 0.4 MeV or less. The reason might be that there was no information on the lower limit energy of the pulse height and that the response matrix itself was a reference value. However, since this was a simple analysis, the process was repeated until peak components could be subtracted.

The first row at 1.6 MeV in Table A3 came from Table A1. When the incident of gamma ray at 1.6 MeV was '9', the value at 1.5 MeV row was obtained by subtracting the Compton scattering fraction generated thereby from PHC of the first row at the energy band <1.5 MeV ($j = 1, 2, \dots, 15$). Next, when '10' of the 1.5 MeV band in column of the 1.5 MeV row was incident, the Compton scattering fraction generated thereby was subtracted from the corrected PHC at energy band of 1.4 MeV or less. This was repeated until the 0.2 MeV row. The lowermost row of 'unfold' was obtained by taking out diagonal components of a triangular matrix and was the corrected count data in which Compton scattering fraction had been removed (unit: 1000 counts/40 sec).

(5) The corrected count data were converted into gamma-ray flux by energy band in consideration of detection sensitivity of NaI detector, as shown in Table A4. For detection sensitivity,

Table A1. PHC of 'below the SG manhole'.

		Energy band (MeV)															
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
Counting rate (1000 counts/40 sec)		77	251	194	158	123	105	105	74	57	46	42	36	26	18	12	9

PHOTON EXPOSURE RECEIVED BY NPP WORKERS IN JAPAN

Table A5. Air kerma rate by energy band.

															Energy band (MeV)			
0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6			
Air kerma rate (unit: 10^{-15} Gy/h)																		
0	50	74	91	110	144	218	180	156	154	182	181	154	144	118	123			

conversion factor (unit: 10^{-12} Gy cm^2) was applied by interpolating Table A.1 of ICRP Publ. 74⁽²⁶⁾ with quadratic formula. Based on

this air kerma rate, the dose ratio of <0.3 MeV was estimated as the next.

Less than 0.3 MeV:0.3 MeV and over = 124:1954 = 6%: 94%.

(4) 白血病を対象とした各国の放射線業務従事者および原爆被爆者の疫学研究の概要. *Jpn. J. Health Phys.* 55, 215-225, 2020.

Jpn. J. Health Phys., 55 (4), 215 ~ 225 (2020)

DOI: 10.5453/jhps.55.215

解説

白血病を対象とした放射線業務従事者および原爆被爆者の疫学研究の概要

賞雅 朝子^{*1, #}, 當麻 秀樹^{*1}, 工藤 伸一^{*2}

(2020年4月10日受付)

(2020年9月15日採択)

Outline of the Radiation Epidemiological Cohort Studies for Leukemia among Nuclear Workers and A-bomb Survivors

Asako TAKAMASA,^{*1, #} Hideki TOMA^{*1} and Shin'ichi KUDO^{*2}

The risk of leukemia related with radiation exposure was pointed out in a case report of a physician in 1911 and in subsequent reports. After that, many cohort studies among nuclear workers have been conducted in various countries on the leukemia risk at low dose and/or low dose rate radiation. However, these studies did not have consistent conclusions. INWORKS and UK NRRW cohort studies argued high risk with leukemia excluding chronic lymphocytic leukemia (CLL) mainly due to chronic myelogenous leukemia (CML), on the other hand, the 15-country study and J-EPISODE study did not show significant high risk of CML. There are some possibilities of this discrepancies and one of that may be based on lacking in statistical power because of that leukemia is a rare disease. Other possibilities of these discrepancies between these studies are based on the differences of dose rate, main component of cohorts, and statistical methods. In this paper, we summarize the subtypes of leukemia, baseline mortality by each study, and methods and results from the major radiation epidemiological studies.

KEY WORDS: low dose radiation, radiation risk, leukemia, cohort study, epidemiological study, nuclear workers.

I 背景, 目的

白血病のリスクと放射線被ばくに関連については1911年の放射線を扱う医師の症例報告¹⁾や、その後続く報告^{2,3)}で指摘されている。その後広島・長崎の原爆被爆者コホートの研究(Life Span Study: LSS)でも白血病の過剰な症例が確認され始めた。原爆投下の7年後に、白血病リスクの増加に関する最初の論文が初めて発表され⁴⁾、その後、1994年と2003年にも放射線による白血病の罹患率・死亡率の過剰を報告する論文が発表された^{5,6)}。後者の2つの論文では、白血病は固形がんの

潜伏期間とされる10年よりも短い2年で増加し始め(特に0~20歳未満の若年層で増加)、その後約6~8年の間にピークに達したと報告されている^{5,6)}。白血病の種類(サブタイプ)ごとの解析では、急性骨髄性白血病、急性リンパ性白血病、慢性骨髄性白血病は放射線によって誘発される可能性が高いことが示された。しかし、慢性リンパ性白血病や成人T細胞白血病は、原爆被爆による増加が認められていない^{5,6)}。LSSによる白血病リスクの研究結果は高線量・高線量率の急性被ばくに基づいている。低線量・低線量率被ばくによる放射線の影響を解明するために、原子力関連の従事者コホート研究を含むさまざまな成人白血病の疫学研究が実施されてきた⁷⁻¹¹⁾。しかしながら、それらの結果は、白血病のサブタイプによって異なる結果が得られており低線量放射線による白血病のリスクについては明確なコンセンサスは得られていない。

本稿は、以上の議論の基になった疫学調査論文を共通の項目でレビューすることによって、議論の背景を整理することを目的としている。そのため、「II 白血病の

*1 日本エヌ・ユー・エス(株); 東京都新宿区西新宿7-5-25 (〒160-0023)

JAPAN NUS Co., Ltd.; 7-5-25 Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 160-0023, Japan.

*2 (公財)放射線影響協会; 東京都千代田区鍛冶町1-9-16丸石第2ビル5階(〒101-0044)

Radiation Effects Association; Maruishi-Daini Bldg. 5F, 1-9-16 Kajicho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0044, Japan.

Corresponding author; E-mail: takamasa-ask@janus.co.jp

概要」で、白血病のサブタイプと放射線以外のリスク要因、また、国別の白血病ベースライン罹患率について述べ、次いで、「III 疫学研究別の調査方法、結果の概要」において、調査研究ごとに、(1) コホートの組成、(2) 線量、(3) 調整変数、(4) 解析結果の共通の項目で概括し、その結果明らかになった論点等を「IV 考察」で述べた。低線量放射線の疫学調査には高自然放射線地域の住民や医療被ばくを対象としたものもあるが、線量測定が正確である点、因果の逆転がないことから放射線業務従事者を対象としたコホート調査、及び代表的な放射線疫学調査である LSS を取り上げた。

II 白血病の概要

白血病の原因と機序は、放射線被ばく、一部の化学物質、ウイルスなどが白血病のリスク要因とされるが、それらが原因と推察される白血病は一部に限られる。白血病は、慢性リンパ性白血病 (CLL: chronic lymphocytic leukemia)、及び急性リンパ性白血病 (ALL: acute lymphoblastic leukemia)¹、骨髄性白血病では慢性骨髄性白血病 (CML: chronic myelogenous leukemia) 及び急性骨髄性白血病 (AML: acute myeloid leukemia)、の4つのサブタイプに大きく分類される。

1. 白血病のサブタイプと放射線以外のリスク要因

白血病はいくつかのサブタイプに分類することができる。がん化した細胞のタイプからリンパ性と骨髄性に分類でき、さらに病気の進行パターンや症状から慢性と急性に分類されている。リンパ性白血病は CLL と ALL、骨髄性白血病は CML と AML に分類される。白血病は全体的に年齢とともに罹患率が上昇する傾向にある。

白血病の原因は遺伝子異常の多様性や複数の危険因子が関与するため、複雑であるが、ダウン症候群や神経線維腫症などの遺伝症候群が若年成人の白血病に関連していることが報告されている¹²⁾。

(1) リンパ性白血病 (CLL, ALL)

有機溶剤、喫煙、老化などにより誘発される可能性が指摘されているが、関連性は十分に解明されておらず、化学物質が寄与している強固な証拠はない。また、CLL において放射線は重要なリスク因子ではないとされている^{13,14)}。このため、放射線と白血病リスクを解析する

時には、CLL を除外して解析されることが多い。ただし後述するように日本では CLL は非常に稀であるため、日本人をコホートとした解析では CLL を除外して解析しても結果に大きな影響を与えない。ALL は未成年での罹患率が最も高いが、30代では低くなり、その後再び年齢とともに上昇する二峰性となっている¹²⁾。

(2) 骨髄性白血病 (CML, AML)

骨髄性白血病ではいくつかのリスク要因が関与することが明らかにされている。骨髄性白血病とベンゼンとの関連は古くから知られており、最初の報告は1928年になされている¹⁵⁾。トルコ¹⁶⁾やイタリア¹⁷⁾の研究では、ベンゼン曝露から AML 発症までの期間の中央値は10年と報告されている。また AML はベンゼンとの関連について、疫学的証拠は十分であると国際がん研究機関 (IARC) により報告されており、IARC の分類ではベンゼンがグループ1 (ヒトに対する発がん性がある) に分類されている¹⁸⁾。

放射線被ばくも骨髄性白血病との関連が明らかになっている。CML は原爆被爆者では被爆後2年で罹患率の上昇が見られ^{19,20)}、X線治療を受けた強直性脊髄炎患者においてもリスクの上昇が報告されている^{21,22)}。また放射線治療による2次がんとして AML の発症が報告されている²³⁾。

喫煙も骨髄性白血病の危険因子との報告があり、これはタバコに含まれるベンゼンやポロニウムなどの放射性物質が関与していると考えられている²⁴⁾。

(3) 成人 T 細胞白血病 (Adult T-cell leukemia: ATL)

上記4つのサブタイプとは別に、成人 T 細胞白血病と呼ばれる HTLV-I ウイルスが原因となる白血病が存在している。日本では沖縄から九州、四国南部、紀伊半島にかけて多く分布しており、日本以外ではカリブ海諸島、西アフリカでも報告例がある²⁵⁾。感染から発症までの潜伏期間が30～50年²⁶⁾と長いこと HTLV-I 感染者が生涯に発症する確率は約5%程度とされている。20歳代までの発症はきわめてまれで、年齢とともに増加し60歳ごろを発症のピークとして以降徐々に減少する。

2. ベースライン罹患率

白血病サブタイプ別罹患率 (年齢調整罹患率 (対人口10万)) について、184か国の比較が報告されている¹²⁾。その中で日本、中国、韓国、米国、カナダ、英国、フランス、ドイツ、イタリア、ロシアの男性の白血病サブタイプ別年齢調整罹患率 (対人口10万) を抽出し、Fig. 1 に記載した¹²⁾。

¹ WHO 分類 (2008 年版) では急性リンパ性白血病は芽球性白血病/リンパ腫と分類されるようになったが、放射線疫学では ICD10 の C91.0 と C91.2 を急性リンパ性白血病として解析することが多いため、本稿もそれに倣った。

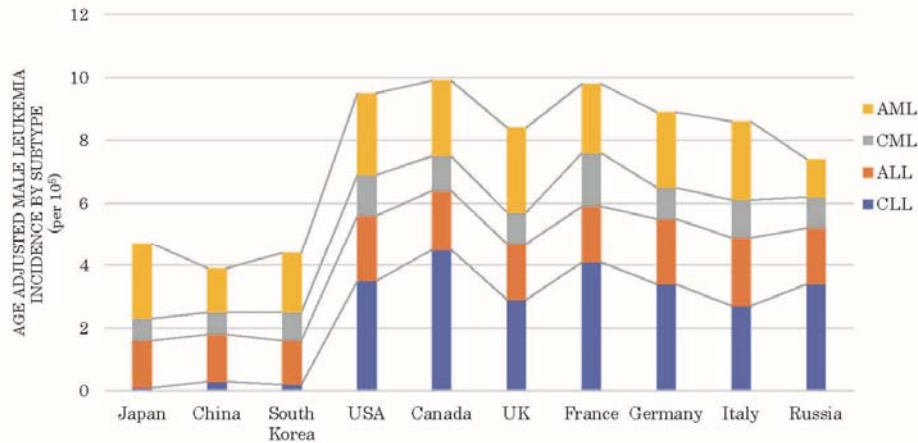


Fig. 1 Age adjusted male leukemia incidence by country, subtype (per 10⁵).¹²⁾
Data by MIRANDA-FILHO A et al. (2019).¹²⁾ Japanese leukemia incidence is different from Europe and other countries. Farther more, the age adjusted leukemia incidence (per 10⁵) is smaller than other countries.

日本、中国、韓国は欧米諸国に比べて全白血病罹患率が4割程度低いという特徴がある。またサブタイプ別にみると、日本、中国、韓国のCLLの罹患率は全白血病罹患率に占める割合が非常に低いが、日本のAMLは184か国中8位と高い罹患率を示しており、全白血病罹患率に占める割合も欧米諸国と比較して大きくなっている。欧米諸国ではCLLが全白血病罹患率に占める割合が高くなっている。ALLは日本を含む一部地域において特異的にみられる疾患であり、日本では全白血病の死亡の1割程度を占めているが、欧米ではほとんど見られない。

III 疫学調査別の調査方法、結果の概要

LSS及び原子力施設等の従事者における職業被ばくを対象とした白血病リスクに関する疫学研究のうち、白血病死亡者（または罹患者）が100人以上となる研究を対象にして研究対象となったコホートの概要、サブタイプ別 Excess Relative Risk (ERR) 等をまとめた (Table 1)。

白血病のリスク推定に用いられる手法の多くは Poisson 回帰である。潜伏期は2年が仮定されることが多い。なお、以下の ERR/Gy (ERR/Sv) は特に言及がなければ直線モデルに基づく。

1. 原爆被爆者の寿命調査 (LSS) (RICHARDSON ら (2009))²⁷⁾

(1) コホートの組成

広島・長崎の原爆被爆者を対象とした調査である。1950年の国勢調査で広島・長崎に住んでいたことが確認された人の中から選ばれた約94,000人の被爆者と、約27,000人の非被爆者から成る約12万人がコホートとされた。寿命調査 (LSS) 対象者に被爆状況の面接調査を行い、質問票による郵便調査で生活習慣などのデータが得られた。

RICHARDSON ら (2009) の研究では、コホートのうち原爆投下時にいずれの市にもいなかった広島と長崎の住民は除外され、86,611人が解析対象となり、1950年から2000年にかけての総観察人年は318万人年であった。女性は半数を占めている。エンドポイントは死亡である。

(2) 線量

個人ごとの被ばく線量は爆心地からの距離や遮蔽状態により推定されており、最新の線量推定方法である DS02 と呼ばれる線量推定方法が採用された。中性子とガンマ線による外部被ばく線量から白血病リスクを推定するために赤色骨髄線量が推定され、2～10年の潜伏期間が仮定された。赤色骨髄線量の平均値は200 mGyであった。

Table 1 Summary of the results of LSS and epidemiology studies among nuclear workers.

Study	LSS ⁽²⁷⁾	LSS ⁽²⁸⁾	J-EPIISODE ⁽⁹⁾	15-country ⁽¹⁰⁾	INWORKS ⁽⁷⁾	NRRW ⁽⁸⁾	US Pooled ⁽³¹⁾
Country	JPN	JPN	JPN	UK, US, FRA, CAN etc	UK, US, FRA	UK	US
Observed period	1950–2000	1950–2001	1991–2010	1943–2000	1944–2005	1955–2011	1944–2005
Main component of cohort ^a	A-bomb survivor	A-bomb survivor	NPP, Res, Fu	NPP, Mili	Mili, Fu, Res, NPP	Mili, Fu	Mili, Res
Cohort size	86,611	113,011	204,103	407,391	308,297	173,081	119,196
Total person years	3,184,000	3,613,404	2,889,000	5,192,710	8,221,032	5,300,000	4,019,065
Percentage of females (%)	55	60	0	2	— ^k	9.8	— ^k
Person years per person	36.8	32.0	14.2	12.7	26.7	30.6	33.7
Doses used in analysis ^b	RBM	RBM	Rec	RBM	RBM	Rec	Rec
Mean dose	200 mGy ^c	100 mGy	13.8 mSv	19.4 mSv	15.9 mGy	25.5 mSv	20.2 mSv
End point	Mortality	Incidence	Mortality	Mortality	Mortality	Mortality Incidence	Mortality
All types	Obs	310	209	275	669	616	
	ERR/Sv (Gy)	4.7		-0.54	0.70		0.40
	CI	3.5, 6.4		-4.04, 2.96	<0, 4.52		-0.41, 1.51
All types excluding CLL	Obs		312	207	196	531	369
	ERR/Sv (Gy)		4.7 ^e	-0.54	1.93	2.96	1.38
	CI		3.3, 6.5 ^f	-4.04, 2.96	<0, 7.14	1.17, 5.21	0.04, 3.34
CLL	Obs	7	12	2	47	138	128 ^l
	ERR/Sv (Gy)				<0	-1.06	-0.60
	CI					NE, ^l 1.81	<-1.69, 0.65
ALL	Obs	19	43	19	19	30	25
	ERR/Sv (Gy)	3.7	2.40 ^f	-2.08 ^g	<0	5.80	1.79
	CI	0.8, 13.0	0.63, 7.90 ^f	-11.92, 7.76 ^g		NE, ^l 31.57	<-7.19, 25.80
CML	Obs	58	75	21	45	100	88
	ERR/Sv (Gy)	6.4	5.24 ^g	9.70	10.1	10.45	6.77
	CI	3.0, 13.7	1.92, 11.8 ^g	10.49, 29.89	0.86, 40.2	4.48, 19.65	2.13, 15.44
AML	Obs	124	176	119	81	254	177
	ERR/Sv (Gy)	4.3	1.11 ^h	-0.83	<0	1.29	-0.19
	CI	2.7, 6.6	0.53, 2.08 ^h	-5.28, 3.61		-1.82, 4.28	<-1.84, 2.28
ATL	Obs	15	47	21			
	ERR/Sv (Gy)	-0.2		5.20			
	CI	nd, ^g 1.78		-13.05, 23.45			

^a NPP: Nuclear Power Plant, Res: Research, Fu: Fuel processing, Mili: Military.

^b Rec: Recorded dose, RBM: Red bone marrow dose.

^c Deaths among cohort members with colon dose of 0.005 Gy or higher.

^d Not determined.

^e All types excluding CLL, ATL.

^f Linear dose coefficient of only males.

^g Linear dose coefficient (at 1 Gy) of Hiroshima city.

^h Quadratic dose coefficient (at 1 Gy).

ⁱ Last estimate (Not converged).

^j Not estimated.

^k Not denoted.

^l Includes nonunderlying cause.

(3) 調整変数

被爆からの経過年数, 被爆時の年齢, 都市及び性別によって調整された。

(4) 解析結果

310人(男性165人, 女性145人)の白血病死亡者が確認された。サブタイプ別の割合をFig. 2に示す。AMLの死亡者数が40%を占め, 次いでCMLが19%で

あり, CMLとAMLで全体の6割を占めている。CLLは死亡者数が7人で, 全体の2%と非常に少ない割合となっている。この解析結果には, 男女が含まれており, また白血病リスクが高くなりやすい若年層も含まれている。

解析の結果, AMLでは線形二次(LQ)の線量反応モデルによくフィットしていると結論された。一方で

CMLとALLでは線形の線量反応によって最もよく説明できるとされ、サブタイプごとに異なるモデルが提唱された。CLL, ATLを除き、全てのタイプで有意に高い放射線リスクが見られた。CMLではERR/Gyが6.4 (90% CI, 3.0, 13.7), ALLでは3.7 (0.8, 13.0), AMLでは4.3 (2.7, 6.6)であった。

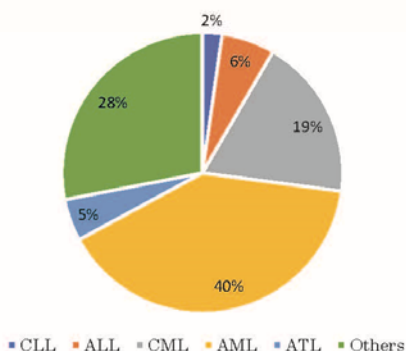


Fig. 2 Distribution of death due to Leukemia in LSS Cohort by RICHARDSON et al. (2009).²⁷⁾

2. LSS (HSUら, 2013)²⁸⁾

(1) コホートの組成

RICHARDSONら(2009)と同じく、広島・長崎の原爆被爆者を対象とした調査である。追跡期間は、前述の論文²⁷⁾よりも1年長くなり、1950年から2001年となっている。対象者は原爆投下時に広島・長崎に住んでいなかった人を含む113,011人で、総観察人年は3,613,404人年であった。女性が約6割を占め、エンドポイントは罹患となっている。

(2) 線量

RICHARDSONら(2009)と同じくDS02で評価された、赤色骨髄線量が用いられた。平均被ばく線量は100 mGyであった。

(3) 調整変数

被爆からの時間、被爆時の年齢、都市及び性別によって調整された。

(4) 解析結果

CLL, ATLを除く白血病では312人の白血病罹患者が確認された。サブタイプ別の罹患割合をFig. 3に示す。RICHARDSONら(2009)²⁷⁾で報告された白血病死亡者数と同じ傾向を示しており、AMLの割合が最も多く、

CMLとAMLで全体の6割を占めている。CLLの罹患患者数は12人で、全体の4%と非常に少ない割合となっている。この結果には、男女が含まれており、また白血病リスクが高くなりやすい若年層も含まれている。

線形と線形二次の両方のモデルで解析された。ATLも解析の対象となっており、CMLとATL以外の白血病に関しては非線形の線量反応関係が示された。ALL, CML, AMLで有意に高い放射線リスクが見られた。CLLを除く白血病のうち、被爆時年齢が20歳以上の男性の罹患患者数は93名で、この集団におけるERR/Gyは2.04 (95%CI, 0.33, 6.85)となっている。全体では白血病罹患リスクは被爆からの経過年数と被爆時年齢に伴って変化し、非線形性の証拠の大部分はAMLに起因していたとまとめられている。

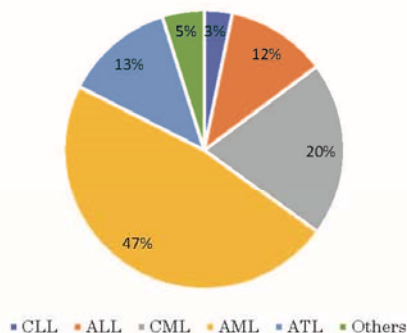


Fig. 3 Distribution of leukemia incidence in LSS Cohort by HSU et al. (2013).²⁸⁾

3. J-EPISODE (Japanese Epidemiological Study On Low-Dose Effects)⁹⁾

(1) コホートの組成

(公財)放射線影響協会が1990年より実施している調査である。コホート204,103人のうち、原子力発電施設での従事実績がある者が8割強を占め、その他を研究施設、燃料加工施設従事者が占めている。男性のみで構成されており、総観察人年は289万人年であった。エンドポイントは死亡である。

(2) 線量

(公財)放射線影響協会放射線従事者中央登録センターに記録された線量が解析に使用された。内部被ばく、中性子線量があった場合にはそれらも合算されたが種で

り、実質的には無視できる。観察終了時の平均累積線量は13.8 mSv、中央値は1.0 mSvであった。2年の潜伏期間が仮定された。

(3) 調整変数

到達年齢、暦年、地域（日本全国を8区分）が調整された。

(4) 解析結果

209人の白血病死亡者が確認された。サブタイプ別の割合をFig. 4に示す。AMLは死亡者数の57%を占め、CMLとALLがほぼ同割合となっている。バックグラウンド死亡率を反映してCLLの死亡者数はわずか2人（全体の1%）であった。いずれのサブタイプにおいても有意に高いERR/Svは観察されなかった。

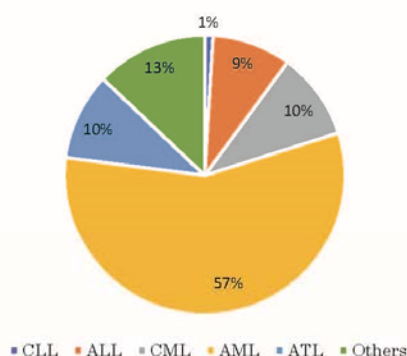


Fig. 4 Distribution of death due to Leukemia in J-EPISODE Cohort.⁹⁾

4. 15 国解析¹⁰⁾

(1) コホートの組成

国際がん研究機関（International Agency for Research on Cancer: IARC）による15か国の原子力産業従事者のデータを用いたプール解析である。オーストラリア、ベルギー、カナダ、フィンランド、フランス、ハンガリー、日本、韓国、リトアニア、スロバキア、スペイン、スウェーデン、スイス、英国、米国の15か国における原子力従事者のうち、外部被ばくについて個々にモニタされた407,391人がコホートとなった。なお、コホートの98%が男性となっており、女性の割合は小さい。1943年から2000年までの観察期間における総観察人年は519.2万人年であった。エンドポイントは死亡である。なお、この研究は公表後にカナダの線量データに不備があり、カナダを除外した場合には放射線リスク推定値が減少す

ることが判明した^{29,30)}。

(2) 線量

記録された線量から、臓器吸収線量換算係数を用いて赤色骨髄の吸収線量が解析に使用された。中性子及びトリチウム以外の核種による内部被ばく線量が全身線量の10%を超える者は、線量測定に不確かさを含むという理由で解析から除外された。平均累積線量は19.4 mSvであった。

(3) 調整変数

性別、年齢及び暦年（いずれも5年カテゴリー）、各国の施設、従事年数（10年未満、10年以上）が調整された。

(4) 解析結果

白血病の死亡者数は合計で275人となっている。サブタイプ別の割合をFig. 5に示す。AMLが30%を占め、次いでCLLとCMLがほぼ同割合の17%となっている。CLLを除く白血病のERR/Svは1.93（90%CI, <0, 7.14）であった。潜伏期間を10年に設定した場合は2.53（<0, 10.45）に上昇することも示されたが、統計的に有意なリスクは見られなかった。

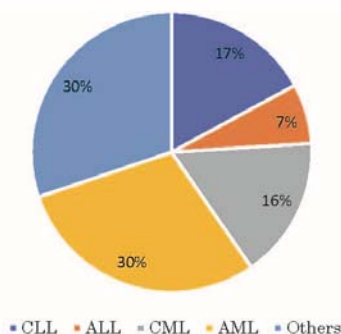


Fig. 5 Distribution of death due to Leukemia in 15-country study.¹⁰⁾

5. INWORKS (The International Nuclear Workers Study)⁷⁾

(1) コホートの組成

仏英米3か国の原子力産業従事者のプール解析である。フランス AREVANC 社、フランス電力公社、英国国家放射線従事者登録、米国原子力委員会、米国エネルギー省、米国国防総省に含まれる原子力従事者の308,297人がコホートとなり、総観察人年は822万人年

であった。15 国解析において、線量測定に不確かさを含むという理由で解析から除外された中性子等による内部被ばく線量が全身線量の 10% を超えると記録された従事者が含まれた。エンドポイントは死亡である。

(2) 線量

線量は線量登録と、政府や企業の記録から入手されており、外部線量から、臓器吸収線量換算係数を用いて赤色骨髄の吸収線量が解析に使用され、2 年の潜伏期間が仮定された。

平均線量は 15.9 mGy、中央値は 2.1 mGy であった。

(3) 調整変数

国、暦年、年齢、性別によって調整されており、社会的経済的地位（職位に基づく管理者、技術者、事務職員、熟練労働者、未熟練労働者、不詳）を加えた調整についても補足的な解析が行われた。

(4) 解析結果

合計で 669 人の白血病死亡者が確認され、本稿で取り上げた研究のうち最も死亡者数が多い。サブタイプ別の割合を Fig. 6 に示す。AML が 38%、次いで CLL が 21% を占めている。ALL は最も少なく 4% となっている。CLL、AML 及び ALL では有意なリスクは観察されなかったが、CML では ERR が 10.45 (90%CI: 4.48, 19.65) と高い値が報告された。CLL を除く白血病では ERR/Gy が 2.96 (1.17, 5.21) となった。中性子を被ばくした従事者を除外した場合は、CLL を除く白血病で ERR/Gy が 4.19 (1.42, 7.80)、CML で 9.55 (2.39, 21.7) であった。

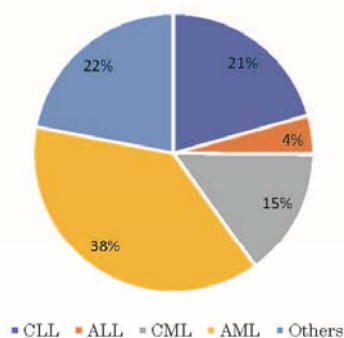


Fig. 6 Distribution of death due to Leukemia in INWORKS study.⁷⁾

6. 英国国家放射線従事者登録 (NRRW)⁸⁾

(1) コホートの組成

1976 年より実施されている英国国家登録された放射線業務従事者を対象としたコホート研究である。

解析対象者の大半は国防省、核兵器・原子力潜水艦等の軍事関連施設の従事者が占め、2 割を使用済み燃料再処理、燃料加工など核燃料サイクル事業施設の従事者が占める。

最新の解析結果では、173,081 人の従事者で構成されたコホートを対象とし、総観察人年は 533 万人年であった。内部被ばくを受けた可能性のある従事者が特定された。この研究では、白血病の死亡または罹患をエンドポイントとして 1 つの ERR/Sv を算出しているが、英国のがん登録は 1971 年からであるため、1971 年以前のエンドポイントは死亡のみであり、それ以降は罹患が主体となっている。女性はコホート全体の 9.8% であるが、白血病症例数（死亡数と罹患数）が不十分であり、平均線量も小さかったことからメインの解析は男性従事者のみが対象となった。本稿においても以降は男性を対象とした結果を示す。

(2) 線量

個人ごとのガンマ線、X 線、ベータ線、中性子線を合算した記録線量実効線量が使用された。線量の大部分は X 線とガンマ線による被ばくで、平均累積線量は 25.5 mSv であり、累積線量が 10 mSv 未満の従事者が 67% を占めた。

(3) 調整変数

初回雇用機関、年齢、性別、職種が調整された。

(4) 解析結果

CLL を除く白血病の死亡者数は 380 人となっている。サブタイプ別の割合を Fig. 7 に示す。日本のコホート (LSS, J-EPISE) と大きく異なり、CLL が 38% と最も多く、CLL と AML で全体の約 70% を占めている。ALL は最も死亡者数が少なく、全体の 4% となっている。

メインの解析が行われた男性従事者では、CLL を除く白血病において、ERR モデルと EAR モデルの両方が、白血病リスクの有意な上昇を示した。全ての白血病の ERR/Sv は 0.40 (90%CI, -0.41, 1.51) と有意ではないが、この中で半分弱を占める CLL は -0.60 (<-1.69, 0.65) と負の値を示しているため、これを除いた CLL を除く白血病の ERR/Sv は 1.38 (0.04, 3.24) と有意に高い値を示した。AML、ALL はいずれも有意に高い ERR/Sv ではなく、CLL を除く白血病の有意に高い ERR/Sv は、CML の 6.77 (2.14, 15.44) という高いリスク推定値の影響を受けていると結論付けられた。また、EAR は 10,000 人年 -Sv あたり 1.33 (0.04, 2.89) であった。

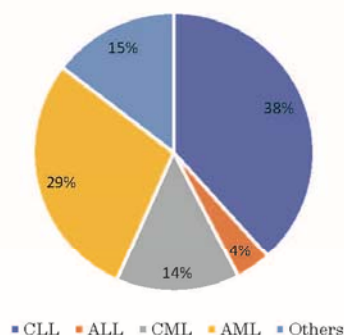


Fig. 7 Distribution of death due to Leukemia in UK NRRW cohort.³⁾

7. 米国合同解析³¹⁾

(1) コホートの組成

米国エネルギー省 (DOE) の管轄下にある核兵器施設 (ハンフォードサイト, アイダホ国立研究所, オークリッジ研究所, サバンナリバーサイト) 及びポーツマス海軍造船所の従事者からなる 119,196 人のコホートである。追跡期間は 1944 年から 2005 年であり, 総観察人年は 402 万人年であった。

(2) 線量

γ 線, X 線, トリチウム, 中性子を合算した実効線量が解析に使用された。平均線量は 20.2 mSv であった。

(3) 調整変数

性別, 人種, 出生年, 従事期間, 従事施設が調整された。

(4) 解析結果

CLL を除く白血病の死亡者数は 369 人であった。CLL の死亡者数は 128 人であった (一部サブタイプが不明であった者を含む)。ERR/Sv は CLL を除く白血病で, 1.7 (95%CI, -0.22, 4.7), CLL で -0.30 (95%CI, -2.0, 3.6) であり, 有意に高いリスクは見られなかった。

8. メタ解析 (DANIELS ら (2011))³²⁾

白血病は稀な疾患であるため, 単独の調査で大きな検出力を得ることは困難である。この検出力の不足を補うためにメタ解析が実施された³²⁾。

従事者及び公衆 (自然放射線を含む) の放射線被ばくと白血病 (CLL を除く) の関連が解析された 23 報の研究をメタ解析の対象とし (本稿で紹介した 15 か国解析¹⁰⁾ が含まれる), 100 mGy 当たりの ERR は 0.19 (95%CI,

0.07, 0.32) と評価された。ただしメタ解析で取り上げたほとんどの研究において, 白血病に影響を与える可能性のある喫煙が考慮されていないことは, 限界の 1 つであると著者らは述べている。

IV 考 察

本稿では 7 つの研究を参照した。職業被ばく研究におけるコホートの組成を見た場合, J-EPISODE は原子力発電施設が主体であるのに対し, 欧米の研究では軍需産業が主体であった。本稿で取り上げた研究における解析手法は, 調整変数に幾分の違いがあるものの, 潜伏期間やモデルはほぼ等しいものであった。また, 本稿では国別サブタイプ別のベースライン白血病死亡率を得られなかったため, 国別のベースラインとして罹患率を取り上げたが, 本稿で取り上げた各疫学調査における放射線リスクの多くは死亡をエンドポイントとしているため, 国別のベースラインの違いを放射線リスクの考察の材料とする際にはこの点に留意する必要がある。本稿におけるベースライン (罹患率・死亡率) と放射線リスクの議論にはこのような不確かさが存在する。

LSS の解析ではエンドポイントが死亡²⁷⁾・罹患²⁸⁾のいずれであっても, CLL を除くすべてのサブタイプの白血病で有意なリスクが観察された。この点は後述する放射線業務従事者の研究結果と異なる点である。LSS には女性・未成年が含まれており, 死亡・罹患のいずれでも若年被曝者において有意に高い白血病のリスクが観察されているが, 特に罹患²⁸⁾では 20 歳以上の男性においても CLL を除く白血病の有意に高い罹患リスク (被曝時年齢が 20 歳以上の男性で, 93 人, ERR/Gy = 2.04 (95%CI, 0.33, 6.85)) が観察された。

慢性低線量率被ばくが主だった被ばく形態で, かつ主に成人男性を対象とする放射線業務従事者の研究では, INWORKS と NRRW において, CLL を除く白血病で有意なリスクが報告された。両者の研究をサブタイプ別にみると CML のみの ERR/Gy (Sv) が高くなっており, AML, ALL, CLL では有意なリスクは観察されなかった。

LSS と放射線業務従事者の研究結果には一貫性がなかった。コホートの違いや, 白血病が稀な疾患で統計的検出力が不足しているために生じるばらつきの可能性もあるが, LSS と放射線業務従事者の平均被ばく線量の違い (LSS の平均被ばく線量 > 100 mGy, 放射線業務従事者の平均被ばく線量は最大 25 mSv 程度), 被ばく形態 (LSS は急性被ばく, 放射線業務従事者は慢性被ばく) の違いも影響したと考えられる。ICRP の発がんの幹細

胞生物学に関する刊行物²⁹⁾では、「最近の研究では損傷を受けた組織幹細胞が正常な幹細胞との競合で排除されることが示されている。このため、慢性被ばくでは、当初にあった全標的細胞に対する累積線量から単純に予測されるリスクより低くなると見込まれる。」ことが記載されている。

また放射線業務従事者の研究だけを比較しても、結果には一貫性がなかった。INWORKSとNRRWで有意に高いリスク推定値が観察されたが、CMLのベースライン罹患率が低いために結果にばらつきが生じた可能性がある。「II 白血病の概要」で述べたとおり、喫煙も骨髄性白血病の危険因子との報告があるため、喫煙による交絡の可能性も考えられる。両者のコホートは軍需産業従事者を含んでおり、古い時代（1940～50年代）の線量データがあることは、プルトニウムによる内部被ばくが寄与した可能性もあり、INWORKSにおいて内部被ばく線量が全身線量の10%を超える従事者が含まれていることにも留意が必要である。

J-EPIISODEではすべてのサブタイプで有意なリスクが観察されなかったが、第II章でも紹介したとおり、日本の白血病のベースライン罹患率は欧米より低い。サブタイプ別のベースライン罹患率を見た場合、AMLとALLでは同程度であるが、CMLがやや低く、CLLは極端に低い。これらの事実は、日本のコホートにおいて他国と同等の統計的な検出力を得るためには、より長い追跡期間またはエンドポイント数を要することを示唆しており、特にCMLとCLLではその必要性が高いと言える。

V 結 語

本稿では放射線業務従事者及び原爆被爆者の疫学調査論文をレビューすることによって、放射線業務従事者と原爆被爆者では結果が異なること、また、放射線業務従事者を対象とした場合でも調査によって結果が異なることを示し、その理由を考察した。

白血病は他のがんと比較すると稀な疾患であり、また医療技術などの発展に伴い白血病の年齢調整死亡率は年々減少しつつある³⁰⁾。今後は死亡に代わるエンドポイントとして罹患データの活用ができたならば統計的検出力の増加に伴い、低線量・低線量率放射線被ばくによる白血病リスクに関して、より精度の高い解析結果を得ることが期待される。

謝 辞

本稿で取り上げた日本の調査（J-EPIISODE）及び本稿

の一部は原子力規制委員会原子力規制庁の委託業務として実施したものである。

利益相反の開示

開示すべき利益相反状態はない。

参 考 文 献

- 1) N. VON JAGIC, G. SCHWARTZ and L. VON SIEBEN ROCK; Blutbefunde bei Röntgenologen, *Berl. klin. Wchschr.*, **48**, 1220 (1911).
- 2) P. S. HENSHAW, J. W. HAWKINS, H. L. MEYER, J. WOODRUFF and J. F. MARSHALL; Incidence of leukemia in physicians, *JNCI J. Natl. Cancer Inst.*, **4** (4), 339-346 (1944).
- 3) C. HERMAN; Leukemia in radiologists, *Radiology*, **43** (3), 275-278 (1944).
- 4) J. H. FOLLEY, W. BORGES and T. YAMAWAKI; Incidence of leukemia in survivors of the atomic bomb in Hiroshima and Nagasaki, Japan, *Am. J. Med.*, **13** (3), 311-321 (1952).
- 5) D. L. PRESTON, S. KUSUMI, M. TOMONAGA, S. IZUMI, E. RON, et al.; Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III. Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987, *Radiat. Res.*, **137** (2 Suppl), S68-97 (1994).
- 6) D. L. PRESTON, Y. SHIMIZU, D. A. PIERCE, A. SUYAMA and K. MABUCHI; Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997, *Radiat. Res.*, **160** (4), 381-407 (2003).
- 7) K. LEURAUD, D. B. RICHARDSON, E. CARDIS, R. D. DANIELS, M. GILLIES, et al.; Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study, *Lancet Haematol.*, **2** (7), e276-281 (2015).
- 8) M. GILLIES, R. HAYLOCK, N. HUNTER and W. ZHANG; Risk of leukemia associated with protracted low-dose radiation exposure: updated results from the National Registry for Radiation Workers Study, *Radiat. Res.*, **192** (5), 527-537 (2019).
- 9) S. KUDO, K. YOSHIMOTO, H. FURUTA, K. INOUE, M. FUKUSHI and F. KASAGI; Occupational radiation exposure and leukemia mortality among nuclear workers in Japan: J-EPIISODE, 1991-2010, *Jpn. J. Health Phys.*, **53**

- (3), 146–153 (2018).
- 10) E. CARDIS, M. VRIJHEID, M. BLETNER, E. GILBERT, M. HAKAMA, et al.; The 15-country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: estimates of radiation-related cancer risks, *Radiat. Res.*, **167** (4), 396–416 (2007).
 - 11) D. B. RICHARDSON, E. CARDIS, R. D. DANIELS, M. GILLIES, J. A. O'HAGAN, et al.; Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS), *BMJ*, **351**, h5359 (2015).
 - 12) A. MIRANDA-FILHO, M. PINEROS, J. FERLAY, I. SOERJOMATARAM, A. MONNEREAU and F. BRAY; Epidemiological patterns of leukaemia in 184 countries: a population-based study, *Lancet Haematol.*, **5** (1), e14–e24 (2018).
 - 13) R. GIBSON, S. GRAHAM, A. LILIENFELD, L. SCHUMAN, J. E. DOWD and M. L. LEVIN; Irradiation in the epidemiology of leukemia among adults, *J. Natl. Cancer Inst.*, **48** (2), 301–311 (1972).
 - 14) R. DOLL; Radiation hazards: 25 years of collaborative research. Sylvanus Thompson memorial lecture, April 1980, *Br. J. Radiol.*, **54** (639), 179–186 (1981).
 - 15) P. DELORE and J. BORGOMANO; Leucemie aigue au cours de l'intoxication benzenique. Sur l'origine toxique de certaines leucemies aigues et leurs relations avec less anemies graves, *J. de Med. de Lyon.*, **9**, 227–233 (1928).
 - 16) M. AKSOY, S. ERDEM and G. DINCOL; Types of leukemia in chronic benzene poisoning. a study in thirty-four patients, *Acta. Haematol.*, **55** (2), 65–72 (1976).
 - 17) E. C. VIGLIANI; Leukemia associated with benzene exposure, *Am. N Y Acad. Sci.*, **271**, 143–151 (1976).
 - 18) International Agency for Research on Cancer, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 120, IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Benzene, France, Lyon (2018).
 - 19) O. J. Jr. BIZZOZERO, K. G. JOHNSON and A. CIOCCO; Radiation-related leukemia in Hiroshima and Nagasaki, 1946–1964. I. Distribution, incidence and appearance time, *N. Engl. J. Med.*, **274** (20), 1095–1101 (1966).
 - 20) Hiroshima and Nagasaki; "The Physical, Medical, and Social Effects of the Atomic Bombings". Pierre AJ, (ed) London: The Committee for the Compilation of Materials on Damage Cau (1981).
 - 21) S. C. DARBY, R. DOLL, S. K. GILL and P. G. SMITH; Long term mortality after a single treatment course with X-rays in patients treated for ankylosing spondylitis, *Br. J. Cancer*, **55** (2), 179–190 (1987).
 - 22) Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Council NR, editor. Washington, D.C.: The National Academies Press, (1990).
 - 23) E. HULEGARDH, C. NILSSON, V. LAZAREVIC, H. GARELIUS, P. ANTUNOVIC, et al.; Characterization and prognostic features of secondary acute myeloid leukemia in a population-based setting: a report from the Swedish Acute Leukemia Registry, *Am. J. Hematol.*, **90** (3), 208–214 (2015).
 - 24) T. UGAI, K. MATSUO, N. SAWADA, M. IWASAKI, T. YAMAJI, et al.; Smoking and subsequent risk of leukemia in Japan: The Japan Public Health Center-based Prospective Study, *J. Epidemiol.*, **27** (7), 305–310 (2017).
 - 25) M. IWANAGA, T. WATANABE and K. YAMAGUCHI; Adult T-cell leukemia: a review of epidemiological evidence, *Front Microbiol.*, **3**, 322 (2012).
 - 26) O. Hermine, J. C. Ramos and K. Tobinai; A review of new findings in adult T-cell leukemia-lymphoma: a focus on current and emerging treatment strategies, *Adv. Ther.*, **35**, 135–152 (2018).
 - 27) D. RICHARDSON, H. SUGIYAMA, N. NISHI, R. SAKATA, Y. SHIMIZU, et al.; Ionizing radiation and leukemia mortality among Japanese Atomic Bomb Survivors, 1950–2000, *Radiat. Res.*, **172** (3), 368–382 (2009).
 - 28) W. L. HSU, D. L. PRESTON, M. SODA, H. SUGIYAMA, S. FUNAMOTO, K. KODAMA, A. KIMURA, N. KAMADA, H. DOHY, M. TOMONAGA, M. IWANAGA, Y. MIYAZAKI, H. M. CULLINGS, A. SUYAMA, K. OZASA, RE. SHORE and K. MABUCHI; The Incidence of leukemia, lymphoma and multiple myeloma among atomic bomb survivors: 1950.2001, *Radiat. Res.*, **179** (3), 361–382 (2013).
 - 29) J. P. ASHMORE, N. E. GENTNER and R. V. OSBORNE; Incomplete data on the Canadian cohort may have affected the results of the study by the International Agency for Research on Cancer on the radiogenic cancer risk among nuclear industry workers in 15 countries, *J. Radiol. Prot.*,

30 (2), 121–129 (2010).

- 30) Canadian Nuclear Safety Commission, Verifying Canadian nuclear energy worker radiation risk: a reanalysis of cancer mortality in Canadian nuclear energy workers (1957–1994), Summary report INFO-0811 (2011).
- 31) M. K. SCHUBAUER-BERIGAN, R. D. DANIELS, S. J. BERTKE, C. Y. TSENG and D. B. RICHARDSON; Cancer Mortality through 2005 among a Pooled Cohort of U.S. Nuclear Workers Exposed to External Ionizing Radiation, *Radiat. Res.*, **183** (6), 620–631 (2015).
- 32) R. D. DANIELS and M. K. SCHUBAUER-BERIGAN; A meta-analysis of leukaemia risk from protracted exposure to low-dose gamma radiation, *Occup. Environ. Med.*, **68** (6), 457–464 (2011).
- 33) The International Commission on Radiological Protection, Stem Cell Biology with Respect to Carcinogenesis Aspects of Radiological Protection, ICRP Publication 131, Paragraph No. 8 (2015).
- 34) National Cancer Center Japan; Kokuritsu Gan Kenkyuu Center [Download site about cancer statistics] (in Japanese). Available at https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/

[dl/index.html](#). accessed on 7th September 2020.



賞雅 朝子 (たかまさ あさこ)

2010年に東京大学で博士(理学)を取得。放射線医学総合研究所・海洋開発研究機構などで放射性同位体分析・環境分析の研究に従事。2017年11月から現職。興味のある分野は放射線疫学、環境分析等。

E-mail: takamasa-ask@janus.co.jp



工藤 伸一 (くどう しんいち)

1991年、(公財)放射線影響協会放射線疫学調査センター統計課採用。2017年、2019年、日本保健物理学会論文賞受賞。2019年、首都大学東京大学院人間健康科学研究科人間健康科学専攻放射線科学域において、博士(放射線学)を取得。

E-mail: s_kudo@rea.or.jp

4. 3 ニュースレター

料金別納
郵便



放射線疫学調査の
進捗状況のお知らせ



公益財団法人 放射線影響協会
放射線疫学調査センター

〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町 1-9-16 丸石第2ビル5階

① ここから開いて中面をご覧ください。



公益財団法人 放射線影響協会
放射線疫学調査センター

〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町 1-9-16 丸石第2ビル5階

電話：0120-574-571（フリーダイヤル）

※ お電話によるお問合せ受付時間
9時30分～16時30分
（土日祝日、年末年始を除く。）

FAX：0120-854-858（フリーダイヤル）

電子メール：chosa@rea.or.jp

※ FAXまたは電子メールでのお問合せの際、返信が
必要な場合は、ご連絡先を明記してください。

② ここから開いて中面をご覧ください。

News Letter
ニュースレター

2020



放射線疫学調査の
進捗状況のお知らせ

郵便はがき

公益財団法人放射線影響協会が原子力規制
庁の委託を受けて行っています「低線量放射
線による人体への影響に関する疫学的調査」
にご理解とご協力を賜り感謝申し上げます。

（原子力規制委員会 HP：https://www.nsr.go.jp/activity/ri_kisei/ekigakutyousa.html）

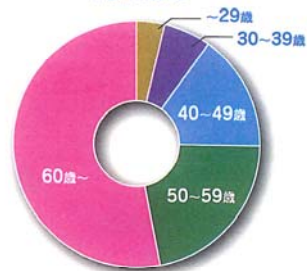
このハガキは平成 27 年から 31 年にかけて
皆様にお送りしました、今後の調査へのご協力
の同意確認調査について同意を頂いた方に、お
約束していたとおり、調査の結果や今後の予定
を情報としてお知らせするものです。特に皆さ
まのお手を煩わせるものではございません。

①

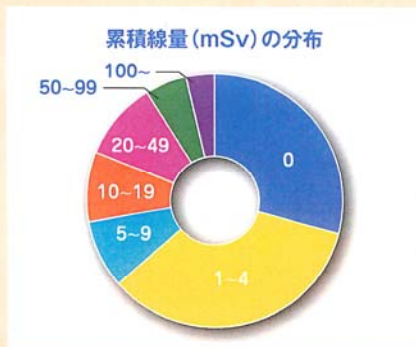
おかげさまで、約 8 万人の方にご参加いた
だけました。参加者を年齢別にみると、60
歳台、50 歳台の方が多くなっています（下
記円グラフ）。

また、調査に参加いただける方々の累積線
量は、6 割の方は 5mSv 未満で、50mSv 以上
の方は 1 割弱となっています（次頁円グラフ）。
これからの調査にご協力いただける方々の大
半は、これまでのお仕事による被ばく線量が
非常に低いことがわかりました。

年齢の分布



②



先の調査では、放射線だけでなく、健康に影響を及ぼす可能性のある生活習慣等の情報を参加者全員の方に答えていただきました。線量の高い人ほどタバコを吸っている割合が高い傾向があるとか、線量と食事傾向の関連など非常に興味ある結果が得られました。ご関心のある方は、当協会のHPをご覧ください。

(<http://www.rea.or.jp/>)



3

今後は、先の調査でご了解いただきました通り、線量情報、住民票情報、全国がん登録情報などを使用させていただき、低線量放射線と健康影響の関連について、科学的な解明に努めてまいります。利用させていただく個人情報については法令に従って、厳重に保管・管理します。

なお、生活習慣等調査で得られた情報は、時とともに変化しますので、数年後に改めて生活習慣調査を行うことがあります。その際には、ご協力をよろしくお願いいたします。

コロナ禍の中、お身体ご自愛ください。

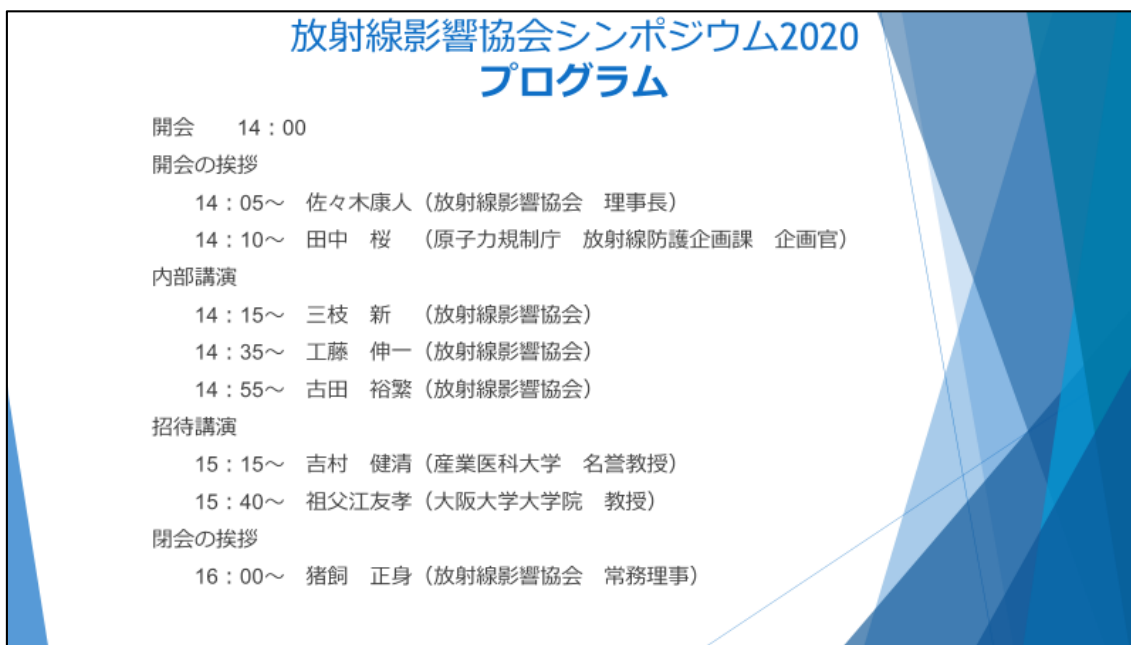
一旦、対象者となることに同意された場合でも、途中で同意を撤回したい場合は、いつでも撤回することができます。その場合は、裏面のお問合せ先にご連絡ください。



4

4. 4 第Ⅵ期調査シンポジウム

シンポジウムプログラム



**放射線影響協会シンポジウム2020
プログラム**

開会 14:00

開会の挨拶

- 14:05～ 佐々木康人 (放射線影響協会 理事長)
- 14:10～ 田中 桜 (原子力規制庁 放射線防護企画課 企画官)

内部講演

- 14:15～ 三枝 新 (放射線影響協会)
- 14:35～ 工藤 伸一 (放射線影響協会)
- 14:55～ 古田 裕繁 (放射線影響協会)

招待講演

- 15:15～ 吉村 健清 (産業医科大学 名誉教授)
- 15:40～ 祖父江友孝 (大阪大学大学院 教授)

閉会の挨拶

- 16:00～ 猪飼 正身 (放射線影響協会 常務理事)