

循環器診療における 放射線被ばく

2019-2020 年度活動

2021 年改訂版

循環器診療における放射線被ばくに関するガイドライン

JCS 2021 Guideline on Radiation Safety in Cardiology

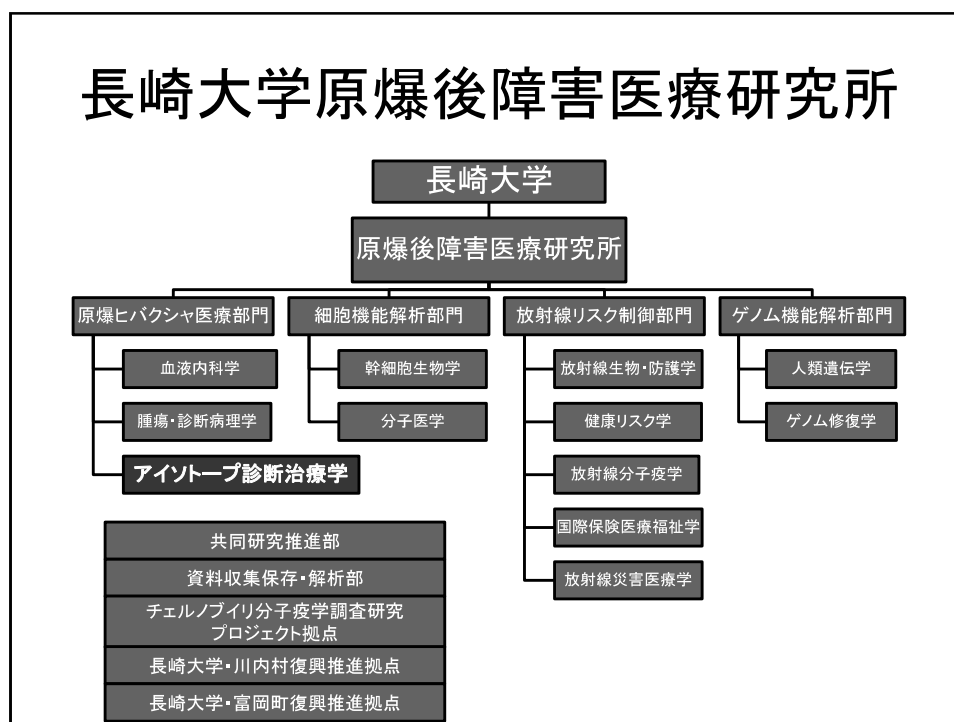
長崎大学 原爆後障害医療研究所
アイソトープ診断治療学研究分野
(原研放射)
工藤 崇

— COI開示 —

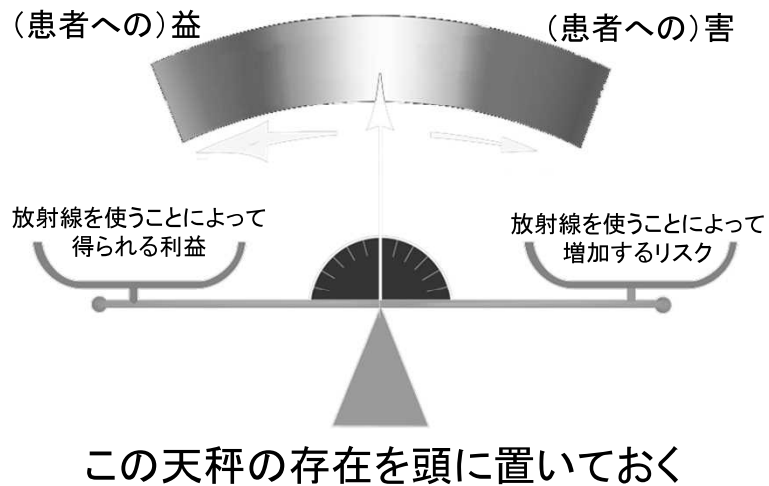
講演内容に関連し、開示すべきCOI関係にある企業などとして

講演料、受託研究・共同研究費、奨学寄附金、旅費
: 日本メジフィジックス、富士フイルム富山化学

一般社団法人日本核医学会

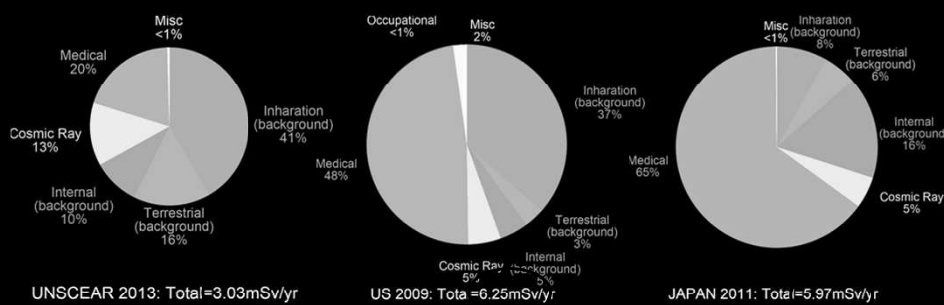


第1章 放射線被ばくの現状と考え方

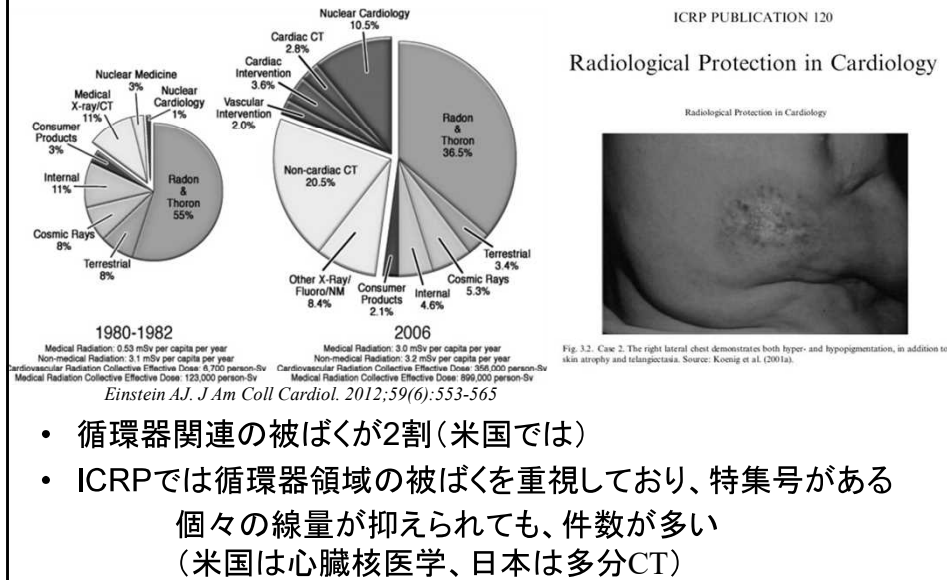


医療被ばくの重要性

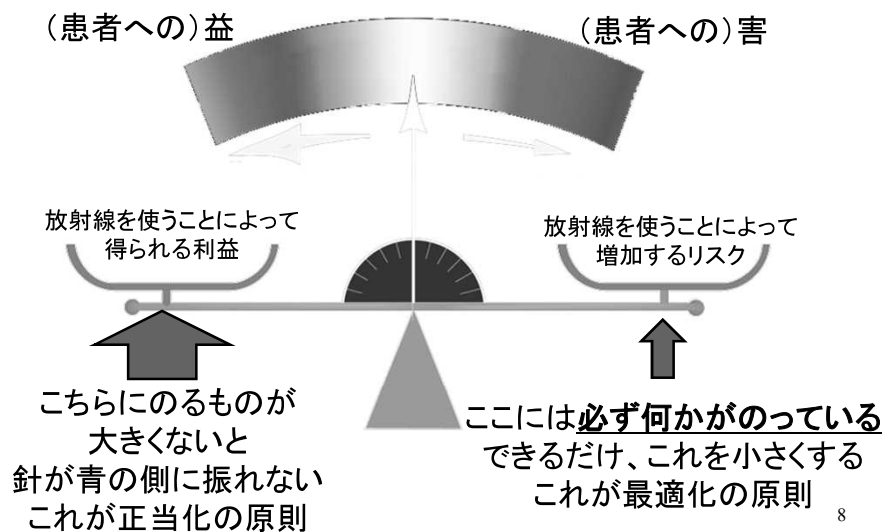
- 医療は公衆被ばくの最大の要因である



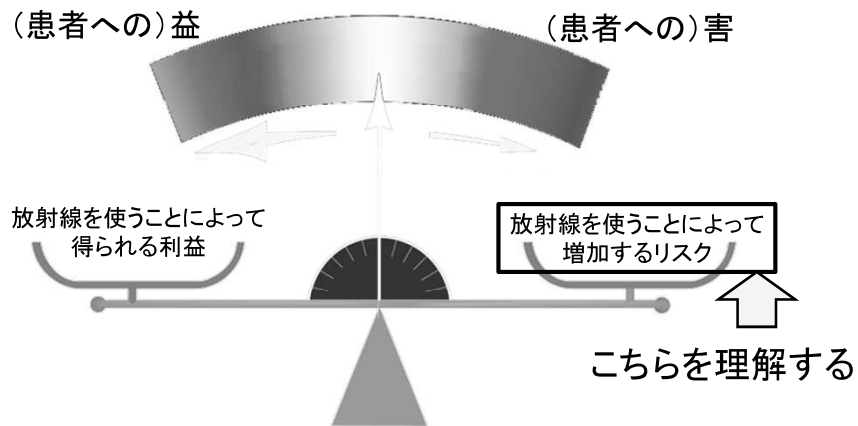
医療被ばくにおける循環器の重要性



正当化と最適化の原則



第2章 放射線安全管理の基礎知識

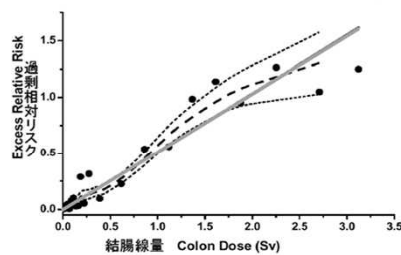


1.2

確定的影響（組織反応）と確率的影響

- 過去の被ばくのデータ（原爆、事故による被ばくなど）から、放射線を浴びる量（線量）が増えるに従って、発がんのリスクが上昇することがわかっている。

- この関係はおおむね原点を通る直線と考えられており（Linear Non-Threshold : LNT仮説）、したがって、どんなに少なくともリスク=0とはならない。

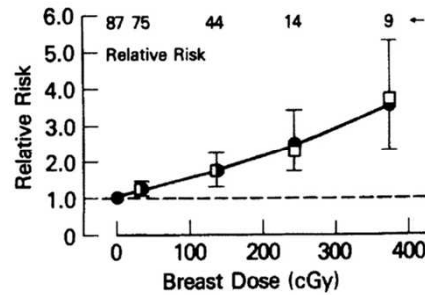


Preston DL. et al. Radiation Research 2003; 160: 381-407より改変引用

これがあがあるが故に、最適化の原則（ALARA）は「合理的に達成可能な限り低く」となる

X線透視による乳癌

- マサチューセッツ州における、結核診断・治療のためのX線透視による乳癌発癌リスク
- 1925~1954年の間に、2573名の対象患者に147件の乳癌が30年間の間に発生した。
- 平均透視回数88回。
- 平均総線量7.9Gy
 - 一回あたりではない



Boice JD Jr. et al. Radiat Res 1991; 125: 214-222より改変引用

かなりきれいな直線性。ただし、エラーバーは大きい。

疫学研究はLNTを支持するか

TABLE 1.1—Ratings of the degree of support for the LNT model by the cancer studies reviewed.

Study (or groups of studies) ^{a,b,c}	Support for LNT Model
LSS, Japan atomic bombs (Grant et al., 2017)	Strong
INWORKS (French, United Kingdom, United States combined cohorts) (Richardson et al., 2015)	Strong
Tuberculosis fluoroscopic examinations and breast cancer (Little and Boice, 2003)	Strong
Childhood Japan atomic-bomb exposure (Preston et al., 2008)	Strong
Childhood thyroid cancer studies (Lubin et al., 2017)	Strong
Mayak nuclear workers (Sokolnikov et al., 2015)	Moderate
Chernobyl fallout, Ukraine and Belarus thyroid cancer (Brenner et al., 2011)	Moderate
Breast cancer studies, after childhood exposure (Eidemuller et al., 2015)	Moderate
In utero exposure, Japan atomic bombs (Preston et al., 2008)	Moderate
Techa River, nearby residents (Schoenfeld et al., 2013)	Moderate ^d
In utero exposure, medical (Wakeford, 2008)	Moderate ^d
Japan nuclear workers (Akiba and Mizuno, 2012)	Weak-to-moderate
Chernobyl cleanup workers, Russia (Kashcheev et al., 2015)	Weak-to-moderate
U.S. radiologic technologists (Liu et al., 2014; Preston et al., 2016)	Weak-to-moderate
Mound nuclear workers (Boice et al., 2014)	Weak-to-moderate
Rocketdyne nuclear workers (Boice et al., 2011)	Weak-to-moderate
French uranium processing workers (Zhivin et al., 2016)	Weak-to-moderate
Medical x-ray workers, China (Sun et al., 2016)	Weak-to-moderate ^e
Taiwan radiocontaminated buildings, residents (Hsieh et al., 2017)	Weak-to-moderate ^e
Background radiation levels and childhood leukemia (Kendall et al., 2013)	Weak-to-moderate ^e
In utero exposures, Mayak and Techa (Akleyev et al., 2016)	No support ^f
Hanford ¹³¹ I fallout study (Davis et al., 2004)	No support ^f
Kerala, India, HBRA (Nair et al., 2009)	No support ^f
Canadian worker study (Zablotska et al., 2014a)	No support ^f
U.S. atomic veterans (Caldwell et al., 2016)	No support ^f
Yangjiang, China, HBRA (Tao et al., 2012)	Inconclusive ^g
CT examinations of young persons (Pearce et al., 2012)	Inconclusive ^g
Childhood medical x rays and leukemia (aggregate of >10 studies) (Little, 1999; Wakeford, 2008)	Inconclusive ^g
Nuclear weapons test fallout studies (aggregate of eight studies) (Lyon et al., 2006)	Inconclusive ^g

強く支持する:

ある程度支持する:

支持するかもしれない

支持しない

結論は出せない

NCRP Commentary No.27より改変引用

医療被ばくによるDNA損傷 : 確実にある

• 医療放射線によるDNA損傷

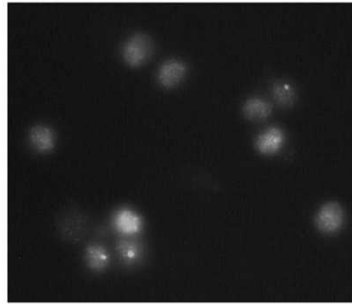
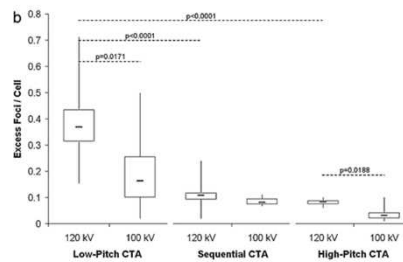


Fig. 1. Exemplary microscope image of γ -H2AX foci in blood lymphocytes (100 $\times$ magnification objective) of a patient undergoing coronary CTA using a low-pitch protocol. The tiny green dots are termed foci, each focus represents one DNA DSB.

γ -H2AX: ヒストン蛋白の一種H2AXがリン酸化された物。

DNA二重鎖切断の部分に生じ、DNA修復に重要な役割を持つ。

その出現はDNA二重鎖切断の存在を示す。

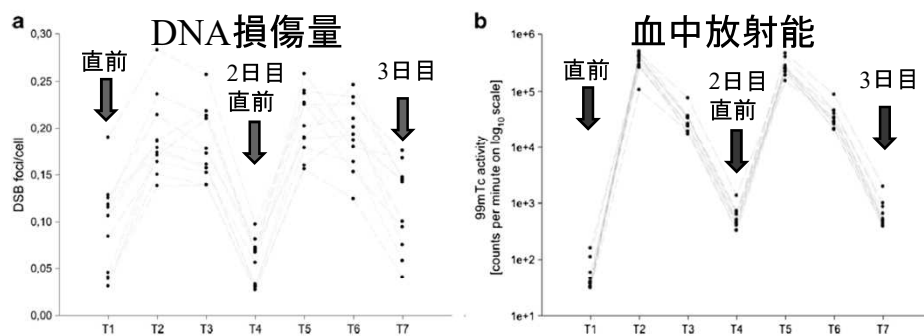


医療被ばくによるDNA損傷とその修復が定量できる。

Brand M, et al. Eur J Radiol (2012); 81: e357–e362

13

心筋血流シンチでは？



Rief M et al. Eur Radiol. 2018; 28: 3075-3081

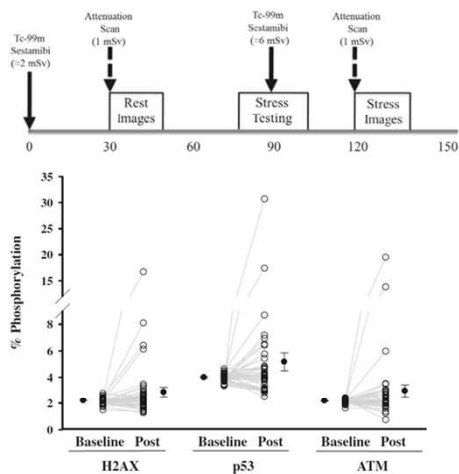
• Tc二日法の検査による検討。

- DNA損傷は起こるが、24時間で正常値に復元する
- 興味深いことに、24時間後は血中放射能はまだわずかに残存している。

14

個人差は？

Protocol for SPECT Myocardial Perfusion Imaging



- Tc系心筋血流製剤+ α
– =10mSv被ばく相当
- 複数のDNA修復経路で、
2/3の患者はDNA損傷
に変化無し。
- 1/3でDNA損傷数が増加。

医療被ばくによる
DNA損傷は一様ではない

Lee WH. et al.
Circ Cardiovasc Imaging 2015;8:e002851

必要不可欠な検査なら、これを逆手にとって、放射線感受性のスクリーニング₅
に使えないか(放射線治療前の副作用予測など)

1.2

確定的影響（組織反応）と確率的影響

- 核医学で確定的影響の線量域になることはま
ず無い。
 - 唯一、全く可能性がないとは言い切れないのは、
TI-201の皮下への全量注射漏れのケース
 - 稲葉智子、中山恵一、水谷仁:皮膚病診療 2001;
23(9):919-921
 - TI-201 74MBqの全量皮下漏れで、2週間後に皮膚壊死
 - 山口一郎、他:保健物理 2002; 37(1): 50-55に線量推定値有り。
» 約1.9Gy.
- 循環器領域では、血管造影時の皮膚炎・皮膚
障害の報告が多い。

しきい線量以下での皮膚紅斑

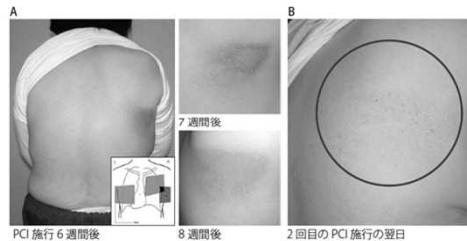


図 5 症例 1：初期紅斑のしきい値以下で発症

表 5 放射線による皮膚障害の現れ方

しきい線量 (Gy)	症 状	発症までの時間
2	早期一過性紅斑	2～24 時間
3	一過性脱毛	3 週以内
6	主紅斑反応	1.5 週以内
7	永久脱毛	3 週以内
14	乾性落屑	4 週以内
15	晩期紅斑	8～10 週
18	湿性落屑	4 週以内
18	虚血性皮膚壊死	10 週以降
24	二次性潰瘍	6 週以降

2021年改訂版 循環器診療における放射線被ばくに関するガイドラインより

• 1.8Gyでの症例

- 100人に1名以下の率では、しきい線量以下でも影響が出る可能性はある。
- あくまでも推定値（本例は照射基準点における空気カーマ積算値）であり、実際に皮膚に与えられたエネルギーと一致しているかどうかは不確定の要素がある。

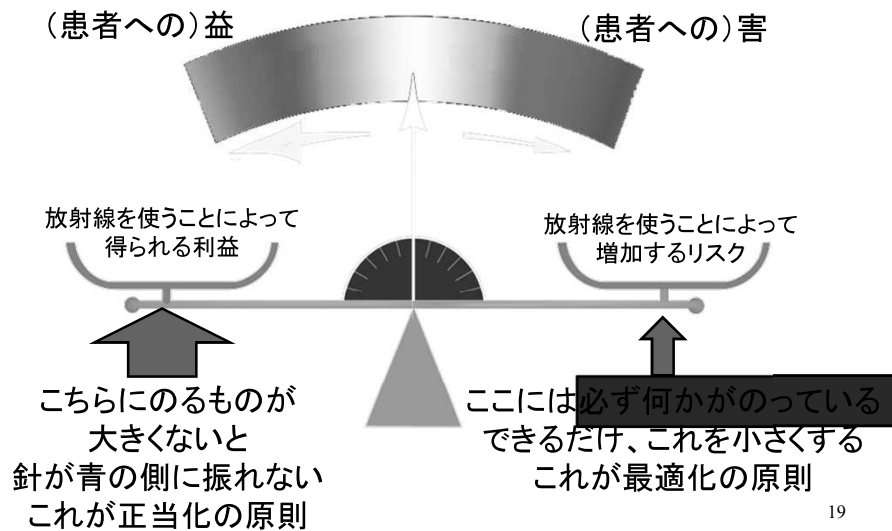
2.

検査室における線量管理

2.1

患者の医療被ばく

正当化と最適化の原則



19

記

医政発 0312 第 7 号
平成 31 年 3 月 12 日

バ

各都道府県知事
保健所設置市長
特別区長 殿

・ 目 行

厚生労働省医政局長
(公印省略)

施
12)

医療法施行規則の一部を改正する省令の施行等について

今般、診療用放射線に係る安全管理体制並びに診療用放射性同位元素及び陽電子断層撮影診療用放射性同位元素の取扱いについて、医療法施行規則の一部を改正する省令（平成 31 年厚生労働省令第 21 号。以下「改正省令」という。）が 2019 年 3 月 11 日に公布され、このうち、診療用放射性同位元素及び陽電子断層撮影診療用放射性同位元素の取扱いに関する規定については 2020 年 4 月 1 日にそれぞれ施行されることとなった。また、改正省令の公布に合わせて、医療法施行規則第一条の十一第二項第三号の二ハ（1）の規定に基づき厚生労働大臣の定める放射線診療に用いる医療機器（平成 31 年厚生労働省告示第 61 号。以下「告示」という。）が告示され、2020 年 4 月 1 日から適用されることとなった。改正省令及び告示における改正の要点及び施行に当たり留意すべき事項は下記のとおりであるので、御了知いただくとともに、貴管下の関係医療機関等に周知お願いする。

20

改正医療法：管理すべき項目

- (2) 線量記録について

- － ア：管理・記録対象産療機器等を用いた診療に当たっては、当該診療を受ける者の医療被ばくによる線量を記録すること。
- － イ：医療被ばくの線量記録は、関係学会等の策定したガイドライン等を参考に、診療を受ける者の被ばく線量を適正に検証できる様式を用いて行うこと。

線量は被ばく線量を検証できる様式でなければならない

すなわち、記録が目的ではない。
患者の被ばく線量を管理し、
振り返って検証できないといけない

21

医療被ばくの管理は。。。

- 単なる記録のみではない。。。。

2.1.3

核医学検査室

表 8 核医学検査室における患者の被ばく線量管理に関する推奨とエビデンスレベル

	推奨 クラス	エビデンス レベル
実投与量による線量管理を行う ^{29, 57, 58)}	I	B
PET/CT 検査および SPECT/CT 検査の CT 撮影においてはボリウム CTDI _w (CTDI _{vol}) または線量 - 長さ積 (DLP) による線量管理を行う ^{29, 57-59)}	I	B
患者の被ばく線量管理を考慮する ²³⁾	IIa	B

- － 後に振り返って、患者の線量を推定し、患者の被ばくに伴うリスクを検証できるものでなければならない。
＞これが実投与量管理の理由

- － 適切な放射線利用につながる、検証と修正 (DRL との比較検証など) が行えなければならない。

22

利用の3原則

- 1) 利用の正当化
 - 放射線を利用することによる患者の利益が、リスクを大幅に上回るのであれば、放射線を利用しないことの方が正当化されない、ということもありうる。
 - 「リスク・不利益」と「便益・利益」とのバランスであることを認識することが重要である。
- 2) 防護の最適化
- 3) 線量限度
 - 医療被ばくには線量限度の原則は適用されない
- **3*) 責任の原則**
 - Einsteinらは「線量限度」に代わる第3の原則として「Responsibility principle: 責任の原則」を提示している
 - 個別の線量の記録、モニタリングを行うこととともに、**20mSv**を超えるような検査では、患者への十分な説明と同意のものに行うことを推奨している。

Einstein AJ, et al. J Am Coll Cardiol. 2014;63(15):1480-9.

2.

検査室における線量管理

2.2

医療従事者の職業被ばく

3.2 水晶体

表 13 放射線業務従事者の眼の水晶体防護のための
推奨とエビデンスレベル

	推奨 クラス	エビデンス レベル
水晶体の等価線量が5年間の平均で20 mSv/年、かつ、いずれの1年においても50 mSvを超えないように管理する ²⁰⁾ 。	I	A
不均等被ばく管理で年間20 mSvを超えた従事者はその時点で5年間を管理の対象とし、その後、水晶体専用の線量計を使用して、5年間で100 mSvを超えないように管理する ⁶⁹⁾ 。	I	A
防護眼鏡は医療スタッフを含め同時に作業する人数分を用意する ⁹⁰⁾ 。	I	A
正面と側面からの放射線防護が可能な防護眼鏡を着用することを考慮する ^{91), 92)} 。	Ila	B

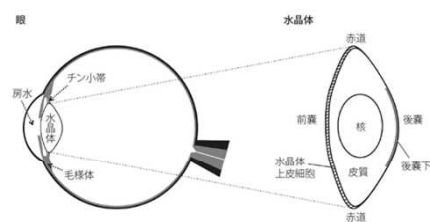


図 17 眼と水晶体の構造
(放射線審議会 眼の水晶体の放射線防護検討部会, 2018⁹³⁾ より)



図 18 眼の水晶体用の線量計
(株式会社千代田テクノロ 提供)

職業被ばく

- 2020年(令和2年)に新たな電離則が公布。
 - 水晶体の線量限度が5年で100mSv, 1年で50mSv以下に制限された。(公布はR2, 施行はR3, 猶予期間あり)

↓
かなり厳しい。

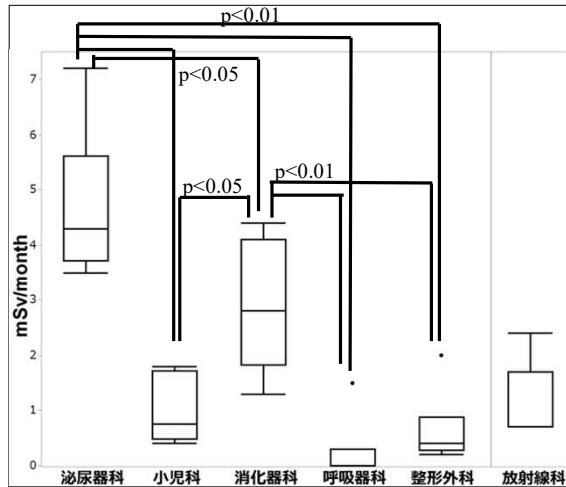
(1) 研究課題名

放射線業務における被ばくの実態と被ばく低減対策に関する調査研究(一般公募型)
(190701)

(2) 研究の背景及び目標

平成30年3月の放射線審議会の意見具申では、眼の水晶体の等価線量限度を5年間の平均で20mSv/年かついずれの1年においても50mSvを超えないことが適当であるとされ、今後電離放射線障害防止規則の改正が見込まれる。現在、年間20mSvを超える放射線業務従事者のほとんどが医療分野の労働者であることから、この分野における被ばく低減に向けた取組が求められているところである。このため、本研究では主に医療分野の事業場における放射線業務従事者の被ばく線量等を調査するとともに、被ばく低減に向けた取組に関する調査を実施しその効果を分析することで、科学的根拠に基づく、実行可能な被ばく低減方策を提案する。

防護眼鏡非着用状態での月間線量



X線透視業務による水晶
体被ばくは予想外に高い。

個人線量の測定ではない
ので、単純化はできないが、
仮にこの透視業務を一人
の医師が行ったとすれば、
月間あたりの最大線量
 $7.2\text{mSv} \times 12\text{月} = 86.4\text{mSv}$ で
あり、**年間50mSvを大幅に
超える。**

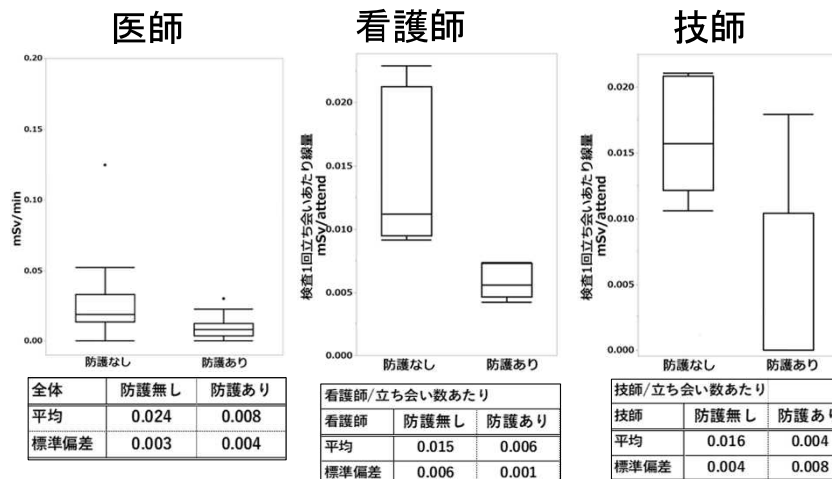
月間平均線量で計算しても、
 $1.758\text{mSv} \times 12\text{月} \times 5\text{年} =$
 105.48 で**100mSv/5年を超
える。**

労災疾病臨床研究事業費補助金

工藤班「放射線業務従事医療関係者の職業被ばく実態調査と被ばく低減対策研究」

令和2年度 総括・分担研究報告書より

防護眼鏡着用の効果

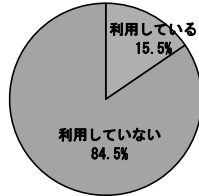


線量低下効果は明らかであり、半分程度に抑えられる

労災疾病臨床研究事業費補助金 工藤班 令和2年度 総括・分担研究報告書より

水晶体被ばくの管理は不十分

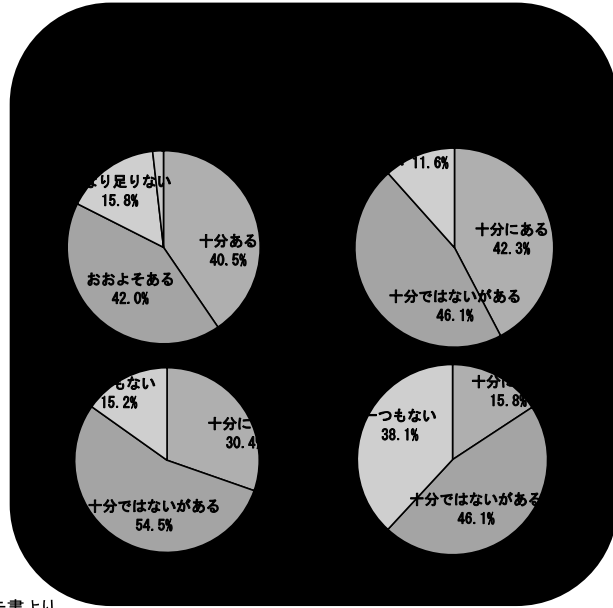
Q39:水晶体専用の放射線測定器を利用していますか。



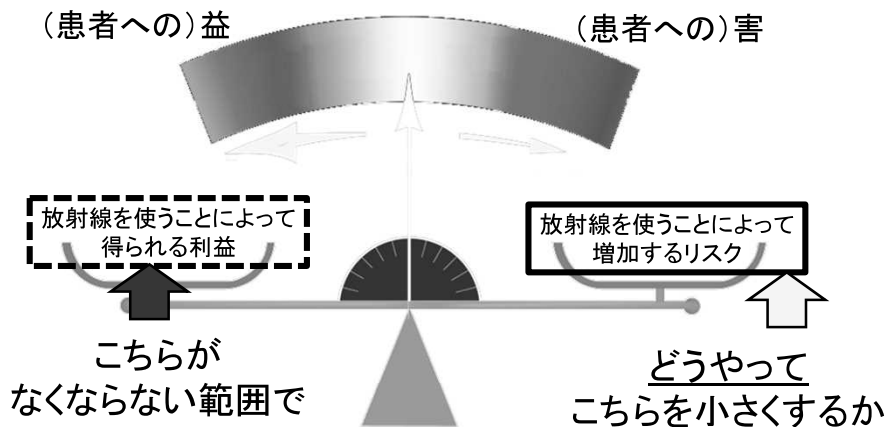
水晶体線量測定器はほとんど使われていない。

- 全国300施設へのアンケート調査

労災疾病臨床研究事業費補助金
工藤班 令和2年度 総括・分担研究報告書より



第3章 放射線被ばく管理の実際



INCAPS研究で提唱された、 8つの”Best practice”

1. TIの使用を避けましょう
2. 2核種を避けましょう
3. Tcの使いすぎを避けましょう
4. TIの使いすぎを避けましょう
5. ストレス単独収集を使いましょう
6. 技術的な線量低減を行いましょう
7. 体重に応じた投与量を用いましょう
8. 負荷・安静の投与量比を保ちましょう

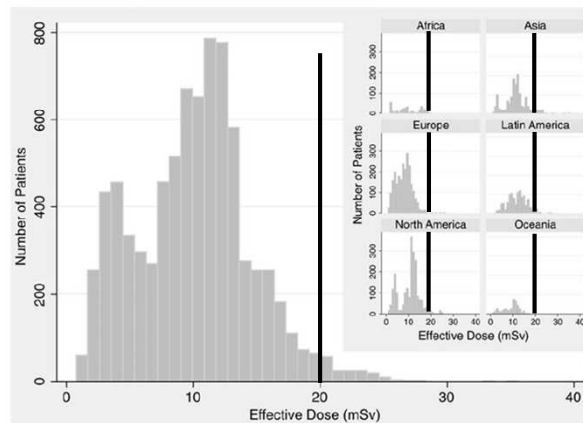
Table 2 Best practice adherence by region

	Number (%) of laboratories adhering to best practice							P-Value
	Africa	Asia	Europe	Latin America	North America	Oceania	Total	
Laboratories	12	69	102	36	55	34	308	n/a
Best practices								
Avoid thallium stress	12 (100)	52 (75)	97 (95)	35 (97)	55 (100)	31 (91)	282 (92)	<0.001
Avoid dual isotope	12 (100)	64 (93)	101 (99)	34 (94)	53 (96)	34 (100)	298 (97)	0.2
Avoid too much technetium	11 (92)	64 (93)	101 (99)	23 (64)	33 (60)	31 (91)	263 (85)	<0.001
Avoid too much thallium	12 (100)	68 (99)	102 (100)	35 (97)	55 (100)	34 (100)	306 (99)	0.48
Perform stress-only imaging	8 (67)	16 (23)	47 (46)	7 (19)	9 (16)	6 (18)	93 (30)	<0.001
Use camera-based dose-reduction strategies	8 (67)	48 (70)	71 (70)	16 (44)	33 (60)	30 (88)	206 (67)	0.005
Weight-based dosing for technetium	6 (50)	8 (12)	48 (47)	11 (31)	10 (18)	5 (15)	88 (29)	<0.001
Avoid 'shine through'	7 (58)	26 (38)	66 (65)	14 (39)	8 (15)	15 (44)	136 (44)	<0.001

Einstein AJ. et al. Eur Heart J (2015) 36, 1689–1696

INCAPS?

- IAEA主導で行われた全世界の心臓核医学検査による被ばく量および関連因子のアンケート調査。
- 残念ながら日本からの参加施設がほとんど無かったため、日本のデータは反映されていない。



Current worldwide nuclear cardiology practices and radiation exposure: results from the 65 country IAEA Nuclear Cardiology Protocols Cross-Sectional Study (INCAPS)

Andrew J. Einstein^{1,2*}, Thomas N. B. Pascual³, Mathew Mercuri⁴, Ganesan Karthikeyan⁵, João V. Vitola⁶, John J. Mahmarian⁷, Nathan Better⁸, Salah E. Bouyoucef⁹, Henry Hee-Seung Bonn¹, Vikram Lele¹⁰, V. Peter C. Magboo^{11,12}, Erick Alexanderson¹³, Adel H. Allam¹⁴, Mousaz H. Al-Mallah¹⁵, Albert Flotats¹⁶, Scott Jerome^{17,18}, Philipp A. Kaufmann¹⁹, Osnat Luxemburg^{20,21}, Leslee J. Shaw²², S. Richard Underwood^{23,24}, Madan M. Rehani²⁵, Ravi Kashyap²⁶, Diana Paez²⁷, and Maurizio Dondi²⁸, for the INCAPS Investigators Group

Einstein AJ. et al.

European Heart Journal (2015) 36, 1689–1696

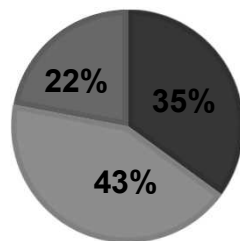
被ばく最適化の手法

• INCAPS研究で提示された8つの「best practices」

– タリウムを利用を避ける 1

- 定義: 70歳以下ではタリウムによる検査をさける。

日本における心臓核医学の 核種別検査割合



■ Tc

■ Tl

■ Both

• 日本では半分がまだTl-201.

– Tl-201の典型的投与量は
111MBq

– Tc-99m 系心筋血流製剤の典型
的使用量は約1100MBq

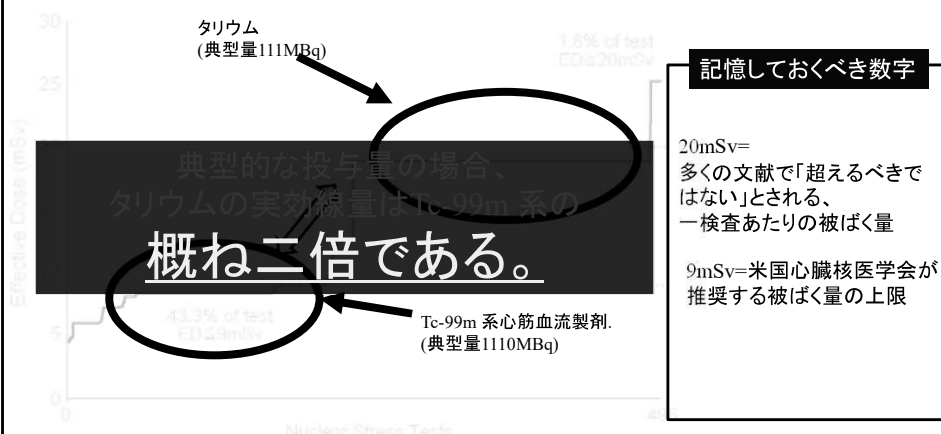
• 欧米ではタリウムは一桁

ドイツ: 2%

アメリカ: 5.6%

Otsuka R, et al. J Nucl Cardiol. 2017 Mar 28. doi: 10.1007/s12350-017-0867-2

日本における 心筋血流シンチに伴う被ばく量は。。。。



Otsuka R, et al. J Nucl Cardiol. 2017 Mar 28. doi: 10.1007/s12350-017-0867-2

TIは単位放射能あたりの被ばくが大きい

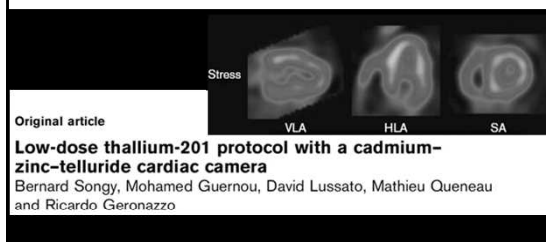
	タリウム	テトロホスミン		MIBI	
		運動	安静	運動	安静
Effective dose (mSv/MBq)	0.14	0.0069	0.0080	0.0079	0.0090

- ただし、TIについては、実効線量の計算式が低くなる方向に変更されている傾向にある。

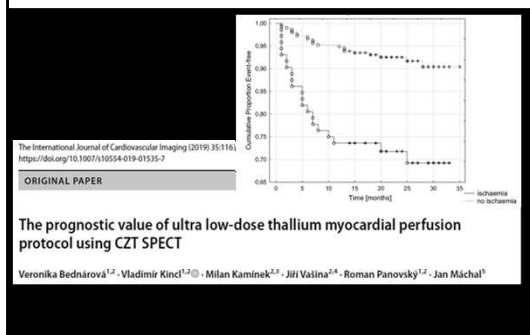
	ICRP pub 53	ICRP pub 80	ICRP pub 53 addendum 5	ICRP pub 106	ICRP pub 128
Year	1988	1998	2001	2008	2015
mSv/MBq	0.23	0.22	0.17	0.14	0.14

殆どの報告では0.17mSv/MBqを採用。
最新の0.14で計算し直せば、約17%少ない被ばくに計算される。

TIでも被ばく量はある程度減らせるが。。



半導体カメラで投与量0.028mCi/kg (60kgだと1.68mCi) > 従来型カメラの70%の投与量で、画質はむしろ向上
被ばく量は約12mSv (平均体重が78kgと大きいので、投与量が日本よりやや多め)



半導体カメラで投与量0.014mCi/kg (60kgだと0.84mCi) > 虚血診断による予後評価が十分可能
被ばく量は約4.5mSv



半導体カメラが必要

被ばく最適化の手法

• INCAPS研究で提示された8つの「best practices」

– タリウムの利用を避ける

- 若年者における問題はINCAPSでは述べられていないが、ICRP pub128のデータからは、テクネチウム系に比べ、タリウムでは若年者における実効線量がより大きくなる傾向が認められる。
 - » 1歳児は成人に比べて、TIでは約9倍、Tcでは約5.5倍影響が大きい
- このことから、若年者においてはテクネチウムの利用が推奨されると考える。

	成人の Effective dose を 1 とした場合の 各年齢の Effective dose の成人に対する比率				
	成人	15 歳	10 歳	5 歳	1 歳
タリウム	1	1.429	4.000	5.643	9.286
テトロホスミン (stress)	1	1.275	1.884	3.043	5.652
テトロホスミン (Rest)	1	1.250	1.875	3.000	5.750
MIBI (stress)	1	1.266	2.025	2.911	5.696
MIBI (Rest)	1	1.333	2.000	3.111	5.889

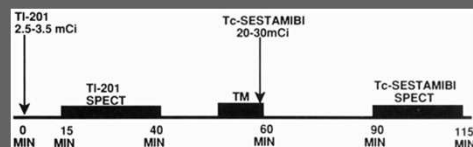
被ばく最適化の手法

• INCAPS研究で提示された8つの「best practices」

– 2核種の利用を避ける **2**

- 定義: 70歳以下ではタリウムとテクネチウムによる2核種検査をさける。
 - ここで述べられている2核種はタリウムとテクネチウムであり、日本で使われているI-123/タリウム (BMIPPやMIBG)のことを指すものではない。

2核種？



TcとTIのエネルギー差を用いることで、2時間以内に負荷、安静の撮影を終了

Berman DS. et al. J Am Coll Cardiol (1993); 22 1455-1464

ただし、線量は22.8mSvと多くなる

- I-123 MIBGやBMIPPはある程度吟味された対象に行われているため、Justificationの観点から一律的に被ばく線量低減を推奨することはここでは避ける。(と、JSNCのガイドラインではしました)

被ばく最適化の手法

• INCAPS研究で提示された8つの「best practices」

– テクネチウムの使用量を適正化する **3**

- 定義: テクネチウムの投与量を1332MBq以下におさえ、実効線量を15mSv以下におさえる。

- 日本のDRL (DRL2015・2020) ではテクネチウム系の二回投与検査のDRLは1200MBqとなっており、これを遵守することで達成可能である。

– タリウムの使用量を適正化する **4**

- 定義: タリウムの投与量を129.5MBq以下に押さえる。

- 日本の前回DRL (DRL2015) ではタリウム心筋血流シンチがこの値を上回っていた (=180MBq)

Einstein AJ. et al. *Eur Heart J*
(2015) 36, 1689–1696

Number (%) of laboratories adhering to best practice

	Africa	Asia	Europe	Latin America	North America	Oceania	Total	P-Value
Avoid too much thallium	12 (100)	68 (99)	102 (100)	35 (97)	55 (100)	34 (100)	306 (99)	0.48

- INCAPSでは、ほとんどの国でこのルールは遵守できていた。

» 守れていなかったのは日本だけ?

- DRL2020では120MBqに低下しており、遵守できていると考えられる。

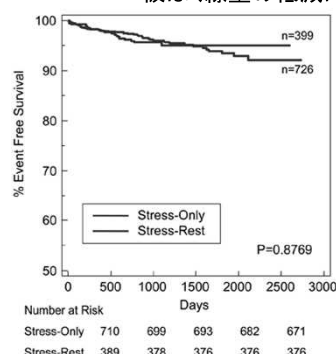
被ばく最適化の手法

• INCAPS研究で提示された8つの「best practices」

– Stress-only imagingを利用する **5**

- 定義: 運動負荷後に画像を確認し、明らかに血流低下がないと判断する場合、安静時検査を省略する。

- 本邦でも全症例の約2/3程度が負荷単独検査となったとする報告があり、被ばく線量の低減に大きく寄与している。



Stress only imagingで正常とされた人と、Stress-restの比較を行った症例で有意な予後の違いは無い。

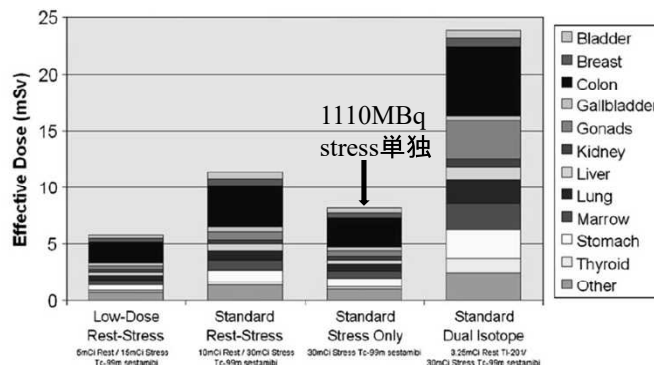


すなわち、Stress onlyに切り替えても、患者への不利益はない。

ただし、この研究は吸収補正あり。
画質は担保されていないといけない。

Ueyama T. *Circ J*. 2012; 76 : 2386-2391

Stress only収集



Duvall WL. et al. J Nucl Cardiol 2011; 18: 847-857

- この研究では、Stress onlyの場合、1110MBqを投与している。
- Stress onlyでは画質を担保するため、投与量が多くしたくなる。
- Dual isotopeは20mSvを超えている。

被ばく最適化の手法

• INCAPS研究で提示された8つの「best practices」

– 技術的な手法を用いて線量低減する **6**

- 定義: 以下の4つの手法のどれか一つ以上を使う。(吸収補正、複数の姿勢(腹臥位撮影など)での撮影、ソフトウェア補正、工学的改良)
 - JSNCでは、1) 収集時間を長くする、2) 工学的改良(半導体カメラなど)、3) 複数の姿勢(腹臥位撮影など)、4) ソフトウェア補正(開口径補正など)を推奨する。
 - 吸収補正は被ばく低減の観点からは推奨から除外する。
 - 心臓専用のコリメーターの利用や半導体カメラの利用:特にタリウムを使用する場合は、上記の技術的手法の利用を強く推奨する。

– 何で腹臥位撮影?

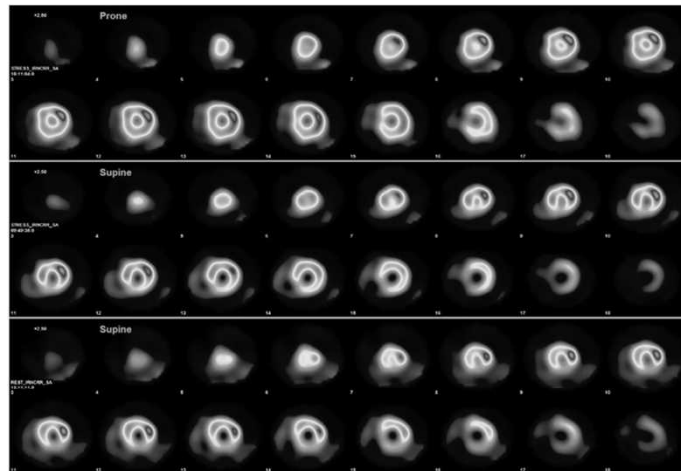
6. Use camera-based dose-reduction strategies: The laboratory performed at least one study using at least one of the following: (i) attenuation correction (CT or line source), (ii) imaging patients in multiple positions, using both supine and prone, (iii) high-technology software (e.g. incorporating iterative reconstruction, resolution recovery, and noise reduction), (iv) high-technology hardware (e.g. PET, a high-efficiency solid-state SPECT camera, or a cardiac-focused collimator). Each of these approaches reduces the radiation dose needed or facilitates performance of stress-only imaging.

Einstein AJ, et al. Eur Heart J. 2015;36(26):1689-96

確かに書いてある

腹臥位を併用すると、 下壁の診断に自信が持てます

Prone
(腹臥位)
負荷



Supine
(仰臥位)
負荷

Supine
(仰臥位)
安静

自施設データ

- Stress onlyの時、自信を持って正常といえる。

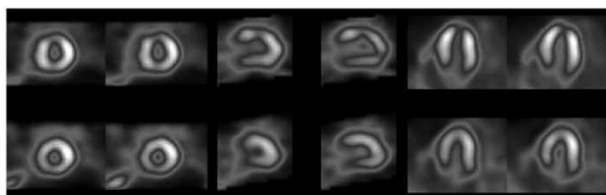
工学的改良：半導体カメラ

A

Conventional SPECT

Rest
20 min

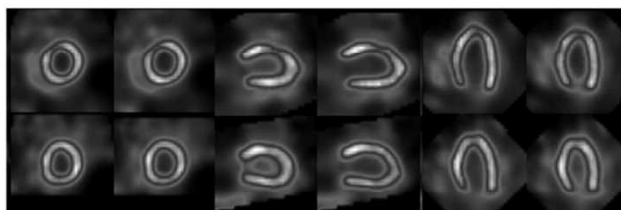
Stress
15 min



High Speed SPECT

Rest
4 min

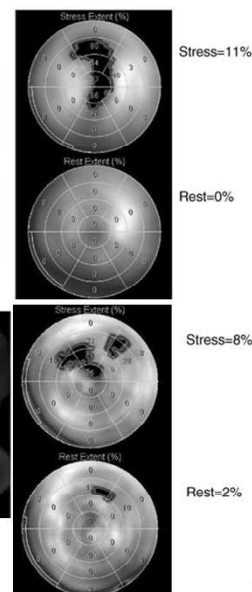
Stress
2 min



Sharir, T. et al. J Am Coll Cardiol 2010;55:1965-1974

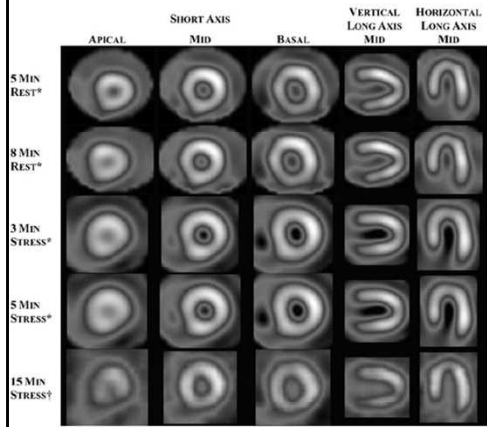
美しい.....まるでPET。

Copyright ©2010 American College of Cardiology Foundation. Restrictions may apply.



JACC
JOURNAL OF THE AMERICAN COLLEGE OF CARDIOLOGY

半導体カメラを用いた被ばく低減



* CZT SPECT
† Conventional SPECT

Duvall WL. et al. *J Nucl Cardiol* 2011; 18: 847-857

- 半導体カメラ(この研究では Discovery530)



投与量を
10(stress)/30(rest)MBqから
5(stress)/15(rest)MBqに半減し
かつ、撮影時間を短縮しても、
画質は十分であった。

半導体カメラを使えば、
被ばくを減らし、
撮影時間も短く、
画像はきれい

Milisievelt study

		Short axis			Long axis		Image assessment				Received dose	
		Apical	Mid	Basal	Vertical	Horizontal	Study quality	Extracardiac activity	SRS	Total perfusion defect (%)	Activity (MBq)	Effective dose (mSv)
Brigham and Women's Hospital: case 003	HE-SPECT						Excellent	None	18	27.2	134	1.15
	A-SPECT						Good	Mild and probably without any interference with scan interpretability	14	23.2	497	4.29
Cedars-Sinai Medical Center: case 033	HE-SPECT						Excellent	None	5	6.3	134	1.16
	A-SPECT						Good	None	4	4.4	248	2.14

Comparison of representative images between ULD HE SPECT and SLD A-SPECT imaging.
Einstein AJ. et al. *J Nucl Med* 2014;55:1430-1437

- 半導体カメラ+Stress only protocolで被ばく量を1mSv程度に抑えることが可能。(この研究はD-SPECT)

被ばく最適化の手法

• INCAPS研究で提示された8つの「best practices」

– 体重に合わせて投与量を最適化する 7

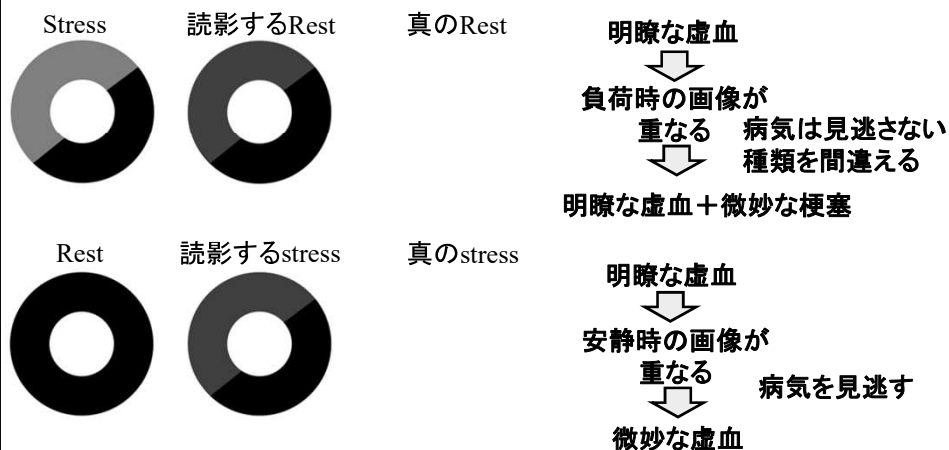
- 解説:日本においてはシリンジ製剤の利用が殆どと思われ、個別の投与量調整が難しい現実があるが、心臓核医学会としては、50Kg以下の体重では投与量を減量することを推奨する。また、小児については、日本核医学会が公表している投与量テーブルを利用することを強く推奨する。

– 「shine-through」を避ける様に負荷・安静の投与量を調整する

• 定義:2回目の投与量を1回目の3倍以上にする 8

- 解説:この項目だけは、被ばくの低減に寄与しないとの調査結果が得られている。
 - 日本の場合シリンジ製剤が主に用いられており、状況は異なる。

Shine-through?



• Stress>Restの順: 比は1:3が推奨

- Rest>Stressの順: 1:3では見逃しが出る? 1:5が良い?

INCAPS 8 best practicesによる 被ばく低減効果

Table 4 Relationship between laboratory best-practice adherence and predicted patient effective dose of radiation

Best practice/factor	Reduction in predicted effective dose (mSv)	95% confidence interval	Standard error	P-Value
Avoid thallium stress	2.54	1.39 to 3.69	0.58	<0.001
Avoid dual isotope	5.42	3.77 to 7.06	0.84	<0.001
Avoid too much technetium	3.12	2.19 to 4.06	0.48	<0.001
Avoid too much thallium	1.05	-2.81 to 4.91	1.97	0.595
Perform stress-only imaging	2.28	1.57 to 2.98	0.36	<0.001
Use camera-based dose-reduction strategies	1.23	0.58 to 1.88	0.33	<0.001
Weight-based dosing for technetium	0.84	0.13 to 1.57	0.37	0.021
Avoid 'shine through'	-1.03	-1.66 to -0.39	0.32	0.002
Age (years)	-0.004	-0.009 to 0.001	0.003	0.142
Female	0.30	0.18 to 0.43	0.06	<0.001
Weight (kg)	-0.04	-0.04 to -0.03	0.002	<0.001
Intercept (predicted effective dose, mSv)	20.5	16.5 to 24.5	2.05	<0.001

Best practiceを守っている施設で守っていない施設に比べてどのくらい線量低減が得られるか

「Shine-throughを避ける」のみ、これに従うと、線量がわずかながら増える。

現場で標識する場合、総投与量を増やすことが出来るので、
1:3にするため、投与量を増やしてしまうと思われる。

シリンジ製剤の場合 朝に1:3にすれば被ばく量も減る。

	タリウム	テトロホスミン		MIBI	
		運動	安静	運動	安静
Effective dose (mSv/Bq)	0.14	0.0069	0.0080	0.0079	0.0090
静注時点での実投与量(MBq)	111	350	702	390	743
投与あたりの被ばく量	15.54	2.415	5.616	3.081	6.687
1検査あたりの被ばく量 (mSv)	15.54	8.031		9.768	
静注時点での実投与量(MBq)		418	660	523	660
投与あたりの被ばく量		2.884	5.280	4.132	5.940
1検査あたりの被ばく量 (mSv)		8.164		10.072	

← 朝に1:3に再分配した場合

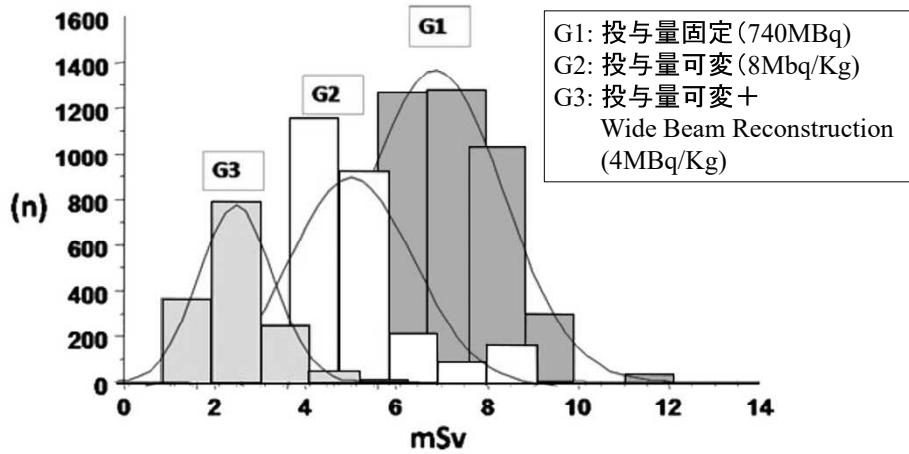
← わずかだが、被ばく量が低い

← シリンジをそのまま使った場合

- 9:00 運動、13:00 安静の投与をTcの小シリンジ(TF:296, MIBI:370MBq), 大シリンジ(740MBq)で検査した場合の推定。

シリンジ製剤の場合、総量は増やせないなので、
分配を変えることになる。結果としてわずかながら線量が減る。

一つに頼らず、組み合わせる



Marcassa C. et al. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* (2013) 40:325–330

- 投与量可変、再構成法改善によりincrementalに被ばく量低減

心臓核医学検査での職業被ばく

Reduction in Occupational and Patient Radiation Exposure from Myocardial Perfusion Imaging: Impact of Stress-Only Imaging and High-Efficiency SPECT Camera Technology

W. Lane Duvall¹, Krista A. Guma¹, Jacob Kamen², Lori B. Croft¹, Michael Parides³, Titus George¹, and Milena J. Henzlova¹

¹Mount Sinai Division of Cardiology (Mount Sinai Heart), Mount Sinai Medical Center, New York, New York; ²Mount Sinai Department of Radiology, Mount Sinai Medical Center, New York, New York; and ³Mount Sinai Department of Health Evidence and Policy, Mount Sinai Medical Center, New York, New York

Duvall WL, et al. *J Nucl Med* 2013; 54: p1251-1257

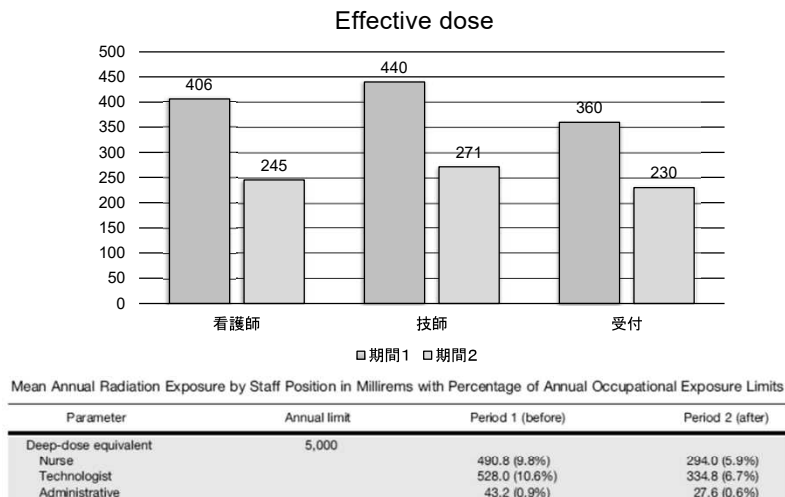
- 期間1 (2007/10-2008/9) :
– ガンマカメラ3台、Stress-onlyプロトコルあまり無し。
- 期間2 (2010/10-2011-9) :
– 半導体カメラ2台、Stress-onlyプロトコル積極的。



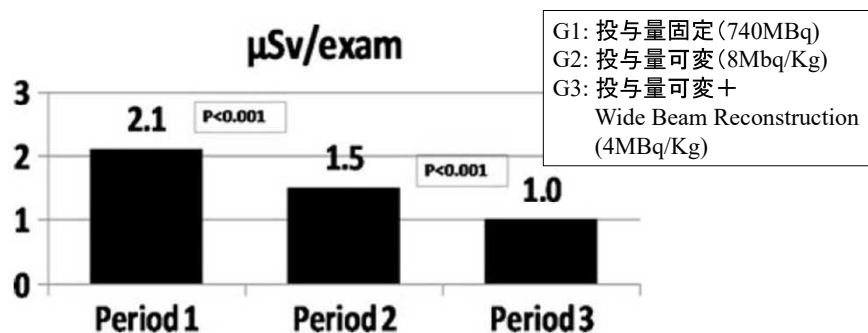
二つの期間のスタッフの被ばくを比べた。

医療関係者の被ばく量

Duvall WL, et al. *J Nucl Med* 2013; 54: p1251-1257



投与量調整と再構成法改善



Marcassa C. et al. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* (2013) 40:325-330

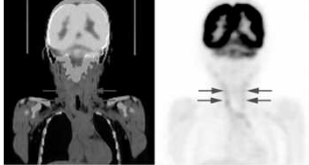
- 患者の被ばくを減らす工夫は、医療者の被ばくを減らすことにつながる。

3.2

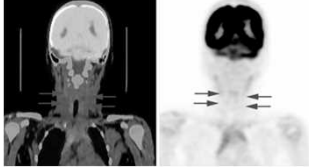
PET検査

- 高安動脈炎は若年者が多い
－ ガイドラインに従った減量を。

Before treatment 7歳; 23.5kg, 77.2MBq



After treatment 11歳; 34.2kg, 108.3MBq



旧ガイドライン

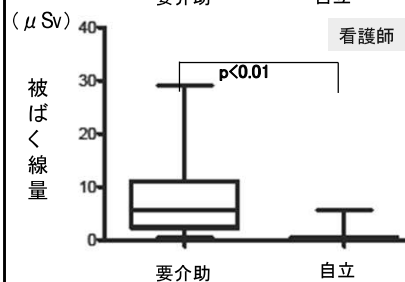
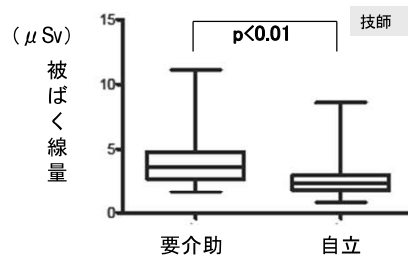
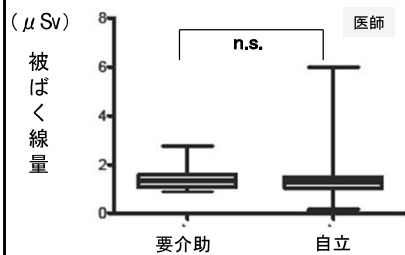
Body weight (kg)	FDG Dose (MBq)
3 or less	14
4	16
6	24
8	30
10	38
12	44
14	50
16	56
18	62
20	68
22	74
24	80
26	86
28	90
30	96

2019年版

Body weight (kg)	FDG Dose (MBq)
3 or less	26
4	26
6	31
8	39
10	49
12	57
14	64
16	72
18	80
20	87
22	95
24	103
26	111
28	116
30	123

FDG PET検査時の医療者の被ばく

長崎大学データ



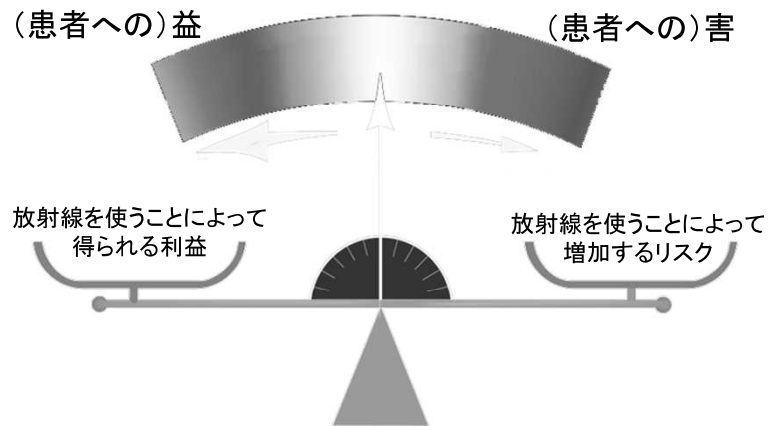
($\mu\text{Sv}/\text{患者}$)	医師	技師	看護師
自立	1.35 $\pm$ 0.60	2.42 $\pm$ 0.90	0.57 $\pm$ 1.10
要介助	1.39 $\pm$ 0.52	4.32 $\pm$ 2.36	9.28 $\pm$ 7.24

介助の必要な患者を事前に把握しておき、
動線・人員配置などを配慮すると
線量低減につながる。

3.2.4

被ばくの危険性と患者への説明

10 mSvの被ばくであれば0.05%の死亡率の上昇に相当する



FDG PETによる癌検診に関する米国核医学会からの声明...

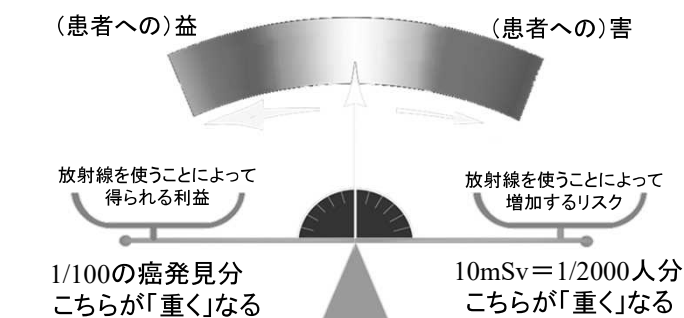


Don't use PET/CT for cancer screening in healthy individuals.

• The likelihood of finding cancer in healthy adults is extremely low (around 1%), based on studies using PET/CT for screening.

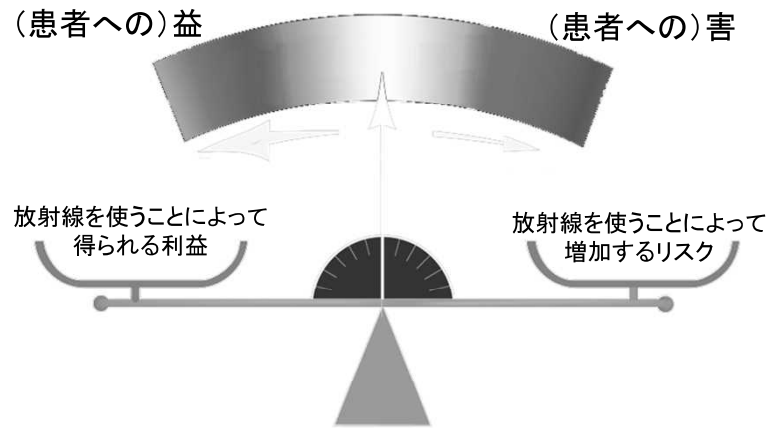
• Imaging without clear clinical indication is likely to identify harmless findings that lead to more tests, biopsy or unnecessary surgery.

- PET/CTをがん検診目的で行うべきではない
 1. PETがん検診でがんが見つかる確率は、1%程度ときわめて低い (extremely low)
 2. 明確な適応無しで画像診断を行うと、不要な手術・治療・生検につながる。



重さの軽重は科学的に決められるものではない

まとめ



この天秤を理解しましょう

おしまい

労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

3) 医療関係者の水晶体被ばくの現状とそれに影響する要因に関する研究

研究分担者	工藤 崇	長崎大学	原爆後障害医療研究所	教授
研究分担者	松田尚樹	長崎大学	原爆後障害医療研究所	教授
研究分担者	高村 昇	長崎大学	原爆後障害医療研究所	教授
研究分担者	織内 昇	福島県立医科大学	先端臨床研究センター	教授
研究分担者	伊藤 浩	福島県立医科大学	医学部	教授
研究分担者	栗井和夫	広島大学	医歯薬保健学研究科	教授

研究要旨

【目的】ICRP の勧告で水晶体被ばくの線量限度を 5 年間で 100mSv、1 年間で 50mSv を超えないように引き下げることが提唱され、本邦でも 2021 年度よりこれに従って電離放射線障害防止規則（電離則）改正が行われ施行された。しかし、実際の医療環境における被ばくの実態、特に水晶体の被ばく状況は十分に調査・検討が行われておらず、改正電離則を実際の医療現場が遵守できるかは明らかであるとはいえない。本研究では現状の医療機関における放射線業務従事者の業務分類毎の水晶体被ばく状況を調査し実態を把握する。【方法】対象としては、特に線量が高いことが予想される X 線透視を伴う業務を対象とした、透視業務に業務従事者に水晶体線量計 DOSIRIS を着用してもらい、個人ではなく業務分類ごとの水晶体被ばく線量を一ヶ月毎の積算線量として測定した。2021 年度は、2020 年度に引き続き、2020 年 10 月に行った、放射線防護眼鏡着用介入後の線量低減効果を調査した。また、2021 年度は、広島大学において、高線量と予測される医療従事者の個人水晶体線量の実測調査、福島県立医科大学における PET 用放射性医薬品製造のためのサイクロトロン業務従事者の個人水晶体線量の実測調査も行った。【結果】2020 年度の放射線防護眼鏡着用前との比較のため、2020 年度のデータを含めて、2020 年 4 月～9 月（介入前）、同 10 月～2021 年 3 月（介入直後）、同 4 月～9 月（介入半年後以降）の 3 区分での検討を行った。昨年度の結果を踏まえて、単位照射時間あたりの水晶体線量を検討の対象とした。介入直後には単位時間あたりの線量は 1/3 程度への有意な減少が見られたが、介入半年後では介入前との有意差が消失し、線量低減のためには、継続的な介入が必須であることが判明した。また介入前には認められた水晶体線量の診療科毎の際は介入後には消失しており、特定の診療科の被ばくが高いと言う事象はないと考えられた。広島大学の調査では、最も高線量であったのは消化管透視を担当する放射線技師で有り、5 年の推定積算水晶体線量が 100mSv の線量限度を超える可能性が認められた。福島県立医科大学におけるサイクロトロン業務従事者の測定では、2 名の水晶体線量が測定され、いずれも 0.5mSv/月以下であり、適切な防護が得られていると思われた。【考察】防護眼鏡の利用による線量低減効果は明らかであるが、介入の持続性が重要であることが明らかとなった。また、個人線量調査では、特定の業務で非常に高い線量となることが疑われたが、サイクロトロン業務従事者については、やや高い線量ではあるものの、線量限度は超えない可能性が示唆された。

A. 研究目的

2011 年の ICRP ソウル声明において、水晶体被ばくの線量限度を 5 年間で 100mSv, 1 年間で 50mSv と引き下げることが勧告された。これに基づき本邦でも 2021 年 4 月施行の電離則改訂で水晶体線量限度が引き下げられている。しかし、実際の医療現場において、水晶体線量がどの程度のもので、どのような業務が高線量となっているかは不明である。実際に引き下げられた線量限度を遵守することが出来るかは明らかでなく、例えば米国では遵守困難との考えから、線量限度の改定が行われていない。遵守可能であるか、また遵守困難である場合、どのような介入を行うことで線量を低減させることが出来るか、これらを明らかにするためには、まず現状における実臨床での被ばく実態を把握することが必須である。本研究では放射線を扱う業務を分類し、分類毎の水晶体線量を実測し、線量の高い業務分類を把握する。また、水晶体線量低減のための介入を行い、介入前後での線量低減効果についても検証する。

2021 年度は 2020 年度に引き続き、介入後のデータを収集した。また、線量が高いと思われる X 線透視業務従事者や PET 用放射性医薬品製造に携わる医療関係者の水晶体被ばくの個人測定を行った。

B. 研究方法

長崎大学病院において、放射線業務のうち、被ばく線量が多いと推定される透視を伴う業務について、透視業務の多い泌尿器科、小児科、消化器内科、その他の内科（主に呼吸器）、整形外科、放射線科を単位業務分類として扱い、業務分類毎の線量を調査

した。また、透視業務に立ち会う看護師と診療放射線技師においても調査を行った。調査は千代田テクノル社製 DOSIRIS を利用し、業務分類毎に DOSIRIS を共有し（例：泌尿器科の透視業務 A に医師 a が携わり、その後泌尿器科の透視業務 B に医師 b が携わる場合は同じ DOSIRIS を共有して連続して測定を行う）業務毎の水晶体被ばく線量を月ごとに集計した。また、同時に月あたりの検査の回数、検査毎の照射回数、検査毎の照射時間を記録し、月ごとに集計した。2021 年度調査に引き続き、2022 年度の調査では介入後のデータを継続収集した。

また、広島大学において、業務上行われている線量調査のデータから高被ばくが予測される 15 名の放射線業務従事者において 2021 年 4 月～10 月に DOSIRIS を用いた水晶体個人線量の実測調査を行った。

また、福島県立医科大学においては、従来あまり注目されていなかった、PET 用放射性医薬品製造に携わるサイクロトロン業務従事者の水晶体被ばく調査を、2021 年 7 月と 2022 年 2 月の 2 回実施した。

（倫理面への配慮）

長崎大学医歯薬学総合研究科において倫理審査を受け、承認を得た（許可番号:20032703）。

C. 研究結果

1) 業務毎の被ばく線量調査

長崎大学では 2020 年度の調査を行う以前には放射線防護用の防護眼鏡は放射線科以外の医師では全く使用されていなかった。このため、2020 年 4 月～9 月は介入を行わず、放射線防護の介入を行う以前のデータ

を収集した。10月に放射線防護のための防護眼鏡を着用することを推奨する介入を行ったため、2020年10月～2021年3月までを介入直後としてデータ収集した。2021年度調査では、2021年4月の業務移動により2020年度に防護眼鏡着用に強く介入指導を行っていた看護師が部署転換され、積極的介入の頻度が明らかに低下したことを踏まえ、2021年4月～9月のデータを介入半年後以降として調査、「介入前」「介入直後」「介入半年後～」のそれぞれ6か月の区分での検討を行うこととした。

1-1) 水晶体線量と検査数・時間の関係

前年度調査より、泌尿器科の業務における水晶体被ばく線量が他科に比して有意に高いが、これは単純に検査回数が多いことに強く影響されている事実が明らかであったため、本年度は検討する項目を決定するため、水晶体被ばく線量(月間積算値)と検査数、X線照射時間、X線照射回数との相関を調査した。

水晶体線量との相関について、介入前では、検査件数が $p<0.01$, $R^2=0.696$ 、照射時間が $p<0.01$, $R^2=0.652$ 、照射回数が $p<0.01$, $R^2=0.533$ 、と検査件数との相関係数が、わずかに照射時間との相関件数を上回っていたが、介入直後では、検査件数が $p<0.05$, $R^2=0.274$ 、照射時間が $p<0.01$, $R^2=0.647$ 、照射回数が $p<0.05$, $R^2=0.289$ 、介入半年後では、検査件数が $p=0.05$, $R^2=0.330$ 、照射時間が $p<0.01$, $R^2=0.538$ 、照射回数が $p<0.05$, $R^2=0.553$ 、となり、恒常的に月間積算値と強く相関するものは照射時間であった。このため、DOSIRISで測定される水晶体線量の月間積算値をX線照射時間で除した、単位

時間あたりの線量を検討の対象とした。

1-2) 介入の効果

医師の単位時間あたり水晶体線量は、介入前には平均値 $0.026\pm0.023\text{mSv/min}$ 、最大値 0.125mSv/min 、中央値 0.020mSv/month 、最小値 0.002mSv/min であった。これは介入直後には平均値 $0.009\pm0.006\text{mSv/min}$ 、最大値 0.029mSv/min 、中央値 0.008mSv/month 、最小値 0.002mSv/min と、約 1/3 程度へと有意な低下をみとめたが、介入半年後では、平均値 $0.024\pm0.014\text{mSv/min}$ 、最大値 0.044mSv/min 、中央値 0.019mSv/month 、最小値 0.003mSv/min と、介入前との有意な差が失われていた。ただし、データ数について、介入直後、介入半年後では COVID-19 パンデミックの影響のため、検査数の大幅な減少が見られ、該当する透視検査がない月、あっても1～2例のため、線量値が測定限界以下となり、有用なデータが得られなかった月があり、これにともない介入直後・介入半年後のデータでは呼吸器科のデータが得られなかった。とくに介入半年後で有用なデータ数の減少が著しく、このことが解析に影響している可能性は否定できない(介入前データ数延べ23か月、介入直後データ数延べ21か月、介入半年後データ数延べ12か月)。

1-3) 診療科毎の違い

科毎の比較では、介入前では小児科の単位時間あたり線量が他科に比べて有意に低い値であった(平均 $0.009\pm0.006\text{mSv/min}$ 、最大値 0.017mSv/min 、中央値 0.006mSv/min , $p<0.01$ で呼吸器科に対して、 $p<0.05$ で残る科に対して低い)。最も被ばく量の多い整形

外科に対して約 1/5 の単位時間あたり線量であった。

介入後には、この有意差は消失した。特に介入直後においては、介入前に最も線量の低かった小児科と最も高かった整形外科の比は約 1/3 に縮小していた（小児科平均 $0.005 \pm 0.003 \text{ mSv/min}$ 、整形外科平均 $0.014 \pm 0.014 \text{ mSv/min}$ ）。

1-4) 診療科毎の介入の影響

呼吸器科については介入後の該当検査の激減のためデータが得られず、泌尿器科、小児科、消化器科、整形外科における、介入前後の比較を行った。

泌尿器科においては、介入前が平均値 $0.021 \pm 0.008 \text{ mSv/min}$ 、最大値 0.037 mSv/min 、中央値 0.019 mSv/min 、最小値 0.016 mS/min であったが、介入直後には $0.009 \pm 0.002 \text{ mSv/min}$ 、最大値 0.012 mSv/min 、中央値 0.008 mSv/min 、最小値 0.006 mSv/min へと有意な減少が見られた ($p < 0.01$)。しかし介入半年後には $0.026 \pm 0.008 \text{ mSv/min}$ 、最大値 0.035 mSv/min 、中央値 0.024 mSv/min 、最小値 0.018 mS/min と介入前の値とほぼ同じに戻ってしまい、介入の効果が失われていることが明らかであった。

小児科においては、介入前が平均値 $0.009 \pm 0.006 \text{ mSv/min}$ 、最大値 0.017 mSv/min 、中央値 0.006 mSv/min 、最小値 0.003 mSv/min 、介入直後には $0.005 \pm 0.002 \text{ mSv/min}$ 、最大値 0.009 mSv/min 、中央値 0.004 mSv/min 、最小値 0.002 mSv/min 、介入半年後には $0.007 \pm 0.005 \text{ mSv/min}$ 、最大値 0.013 mSv/min 、中央値 0.005 mSv/min 、最小値 0.003 mSv/min と、わずかながら介入後の数値が低下する傾向を認めるものの、有意差は認められな

い。小児科は介入前から他科に比して単位時間あたりの線量が低かったため、介入の影響が少なかった可能性が示唆される。

消化器科においては、介入前が平均値 $0.019 \pm 0.008 \text{ mSv/min}$ 、最大値 0.028 mSv/min 、中央値 0.018 mSv/min 、最小値 0.008 mSv/min 、介入直後には $0.011 \pm 0.004 \text{ mSv/min}$ 、最大値 0.016 mSv/min 、中央値 0.012 mSv/min 、最小値 0.005 mSv/min 、介入半年後には $0.031 \pm 0.015 \text{ mSv/min}$ 、最大値 0.044 mSv/min 、中央値 0.032 mSv/min 、最小値 0.017 mSv/min と、介入直後に若干の低下が認められたものの有意差には至っていない。むしろ介入半年後には値が上昇してしまったため、介入半年後の数値が介入直後に対して、有意 ($p < 0.05$) で高くなってしまっている。

整形外科においては、介入半年後に有意な線量データが得られた月が一ヶ月しかないため、統計解析は介入前と介入直後のみの比較となる。介入前が平均値 $0.049 \pm 0.040 \text{ mSv/min}$ 、最大値 0.125 mSv/min 、中央値 0.041 mSv/min 、最小値 0.014 mSv/min 、介入直後には $0.014 \pm 0.014 \text{ mSv/min}$ 、最大値 0.029 mSv/min 、中央値 0.010 mSv/min 、最小値 0.002 mSv/min となり、値はかなり介入直後に低下している（平均値で介入前に対して介入直後が 28.6%）傾向があるが、統計学的な有意性は得られていない。整形外科のデータの特徴として、標準偏差に見られるデータのばらつきが他科に比べて非常に大きく、このため、統計学的な有意差が得られなかった可能性がある。

2) 個人水晶体線量調査

高線量が予測される個人に対しての個人線量の調査を行った。対象者は広島大学に

おける 14 名の医師と 1 名の診療放射線技師、および福島県立医科大学病院における 2 名の PET 用放射性医薬品・サイクロترون運用業務者である。

2-1) 医師・診療放射線技師

広島大学における 15 名の対象者においては、個人の水晶体線量を 7 か月にわたり調査した。業務内容は医師のうち 8 名が IVR（治療を伴う透視・血管造影）、6 名が透視業務、1 名の放射線技師は消化管二重造影業務に携わる技師であった。

最も高線量であった者は消化管造影に携わる放射線技師で、7 か月の積算線量が 15mSv、この数値から予測される年間水晶体推定線量、5 年水晶体推定線量がそれぞれ、25.7, 128.6mSv と、年間線量限度は超えないが、5 年間の線量限度である 100mSv を超えることが推定された。

医師においては、3 名年間推定線量が 5mSv を超えると推定されたが、一方 5 名の医師は測定限界以下となっていた。

技師 1 名を除く 14 名の医師は業務では IVR と透視業務の 2 業務に分かれたが業務間に有意な線量の違いは認められなかった（1 年間の推定線量；IVR $3.76 \pm 3.62 \text{mSv/yr}$ 、透視 $2.33 \pm 3.21 \text{mSv/yr}$ 、 $p = 0.428$ ）。

医師の所属については、循環器内科 4 名、外科 1 名、内科 3 名、脳外科 2 名、泌尿器科 2 名、放射線科 2 名であり、若干循環器科が他科に比べて高めの傾向はあったが（ $4.95 \pm 4.77 \text{mSv/yr}$ ）、各所属毎の例数が少ないため、統計学的解析は行わなかった。

2-2) PET サイクロترون業務従事者

福島県立医科大学における 2 名のサイク

ロترون業務従事者については 2021 年 7 月および 2022 年 2 月の 2 回、DOSIRIS を用いて個人線量の調査を行った。

2021 年 7 月調査では 2 名とも測定限界以下の数値であったが、2022 年 2 月の調査では、1 名が 0.3mSv、1 名が 0.1mSv の有意な被ばくとなっていた。7 月と 2 月の業務の違いについて、2 月の調査時点の業務が、放射性医薬品の品質試験作業で手動操作を必要とする作業が月間 4 回発生していたことが主な原因であることが、業務調査によって明らかとなった。一方、2 名とも有意ではあるが低い水晶体被ばく線量であること、頸部個人線量計での被ばく推定値がそれぞれ 0.4mSv、0.1mSv と水晶体専用線量計の測定値に近く、頸部個人線量計でも水晶体の実測値が正しく推定できていることが明らかとなった。

D. 考察

2020 年度に引き続き、水晶体線量を実測することで、医療業務従事者の水晶体被ばくの実態と介入の効果を調査することが出来た。例数が少ないため、統計学的解析には限度があるが、前年度調査で示唆された、医師の透視業務における、予想外の水晶体被ばくは、防護眼鏡の着用により、約 1/2～1/3 へと大幅にな低減が出来ることが明らかとなった。一方で、介入直後の半年と、介入後半年以降での検討では、介入後半年以降では介入の効果が失われてしまっていることが明らかとなった。本研究においては、業務中の防護眼鏡着用に関して、2020 年 10 月に X 線透視業務に携わる看護師から積極的介入を行い、2021 年 3 月までは同看護師の介入が継続されたが、2021 年 4 月の人事異

動のため、看護師からの積極的介入の頻度が大幅に低下していたことが判明している。介入による被ばく低減効果が失われたことが観察され、水晶体被ばくの低減のためには継続的で積極的な介入が必要であることが明らかと考える。

今回の調査では、小児科の単位時間あたりの水晶体被ばく線量が他科に比べて低めであることが明らかとなった。介入前ですでに他科に対して低値であったため、介入による低下も小さな幅に止まった。原因は不明であるが、小児を扱うという業務の特殊性から放射線の利用に対する配慮が高い可能性、体幹の小さな小児の場合散乱線の発生が成人に比べて小さいため、水晶体被ばくが低減されている可能性などが考えられる。今後のファントム実験などによる検証が必要と思われた。

上記の業務別の水晶体被ばく調査に加えて、今年度は個人の水晶体被ばくの調査も一部追加して実行した。高線量が予測される医師・放射線技師における調査では、1名の放射線技師において突出して高い線量が観察された。当該対象者の業務が消化管造影であること、近年消化管造影業務は医師の手を離れ放射線技師によって行われる傾向にあること、特殊な技能を要求する業務であるため業務の偏りが生じやすいことが原因と思われる。一方、PET 用の放射性医薬品の合成のために必要なサイクロترون業務に携わる医療関係者についても調査を行った。この業種は、高い放射能・遮蔽の困難な高エネルギー光子を扱うため、高い水晶体被ばくを生じる危険があると想定されていたが、実際の水晶体被ばく線量は比較的低い値となっていた。PET 用放射性医薬品

の合成業務は、放射線防護眼鏡が有効でない高エネルギー・高線量の放射性物質を扱うため、高い水晶体線量であることが危惧されたが、実際には十分な被ばく低減が得られていた。近年 PET 用放射性医薬品合成は、自動化が進み、また業務についても被ばくを生じやすい業務が同定しやすいため、予想外の被ばくを生じていなかったものと思われる。ただし、ごく少数例での検討であるため、より広い範囲での検討が必要と思われる。

E. 結論

医療現場における透視業務を行う医師の水晶体被ばくは予想を超えて高いものであったが、防護眼鏡の着用介入によって大幅な低減が可能であった。一方で、介入が継続的に行われないと、介入の効果が失われてしまうことも明らかとなった。医師においては、特定の業務、所属科が高被ばくであるという傾向は認められなかったが、小児科のみ例外的にやや低めの被ばくであった。一方、消化管造影業務の放射線技師において著しい高線量例が見られたこと、高エネルギー放射線を扱うサイクロترون業務従事者の被ばくは良好にコントロールされていたこと、等を考慮すると、業務毎に被ばくの特性を捉えて対策を行うことが必要であると思われた。医療関係者の水晶体被ばくを含む被ばく低減のためには、継続的な線量の調査把握、および継続的な教育・介入が必要であると考えられた。

F. 健康危険情報

(総括研究報告書に記載)

G. 研究発表

1. 論文発表

(関連論文)

Tashiro M, Kubo H, Kanezawa C, Ito H. A proposed combination of flat-panel detector and mobile X-ray systems for low-dose image-guided central venous catheter insertion. Fukushima J Med Sci. 67: p161-167, 2021

Masuda T, Funama Y, Nakaura T, Sato T, Tahara M, Takei Y, et al. Use of Vacuum Mattresses Can Reduce the Absorbed Dose during Pediatric Ct. Radiat Prot Dosimetry. 194: p201-207, 2021

2. 学会発表

工藤 崇「Radiation protection of cardiac SPECT and PET imaging」
IAEA Workshop on Cardiac SPECT, SPECT/CT and PET/CT in Clinical Practice including image processing and interpretation.; 2021 年 11 月 3 日
(名古屋国際会議場)

H. 知的財産権の出願・登録状況

(予定を含む)

1. 特許取得

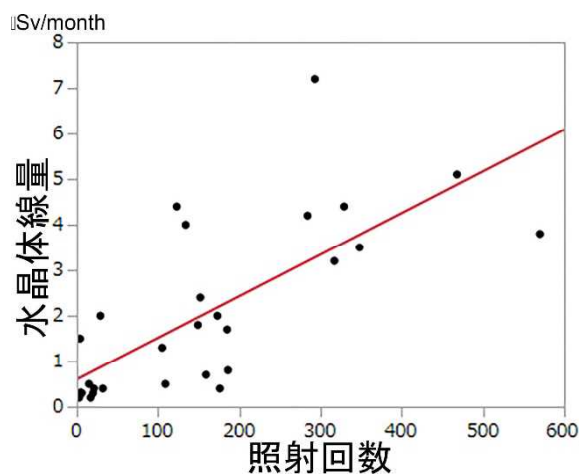
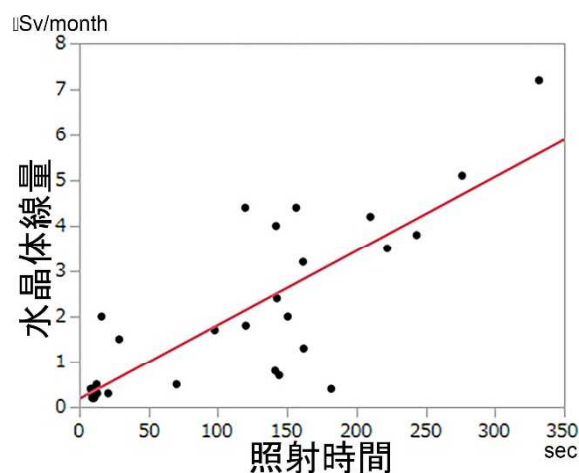
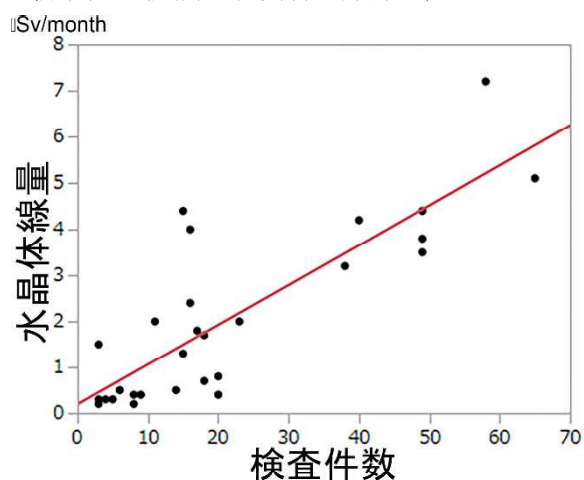
無し

2. 実用新案登録

無し

DOSIRIS で測定された水晶体線量と照射時間、検査回数、照射回数の相関関係

(期間 1：防護眼鏡装着：非介入)



水晶体線量(Y) 対 検査回数(X)

$$Y=0.0864X + 0.197 \quad (p<0.01, R^2=0.696)$$

水晶体線量(Y) 対 照射時間(X)

$$Y=0.0163X + 0.181 \quad (p<0.01, R^2=0.652)$$

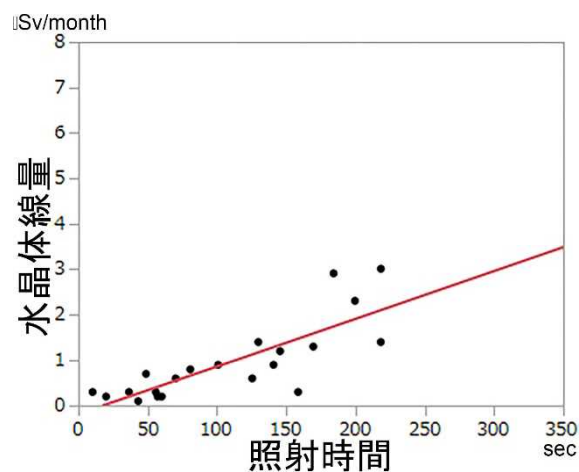
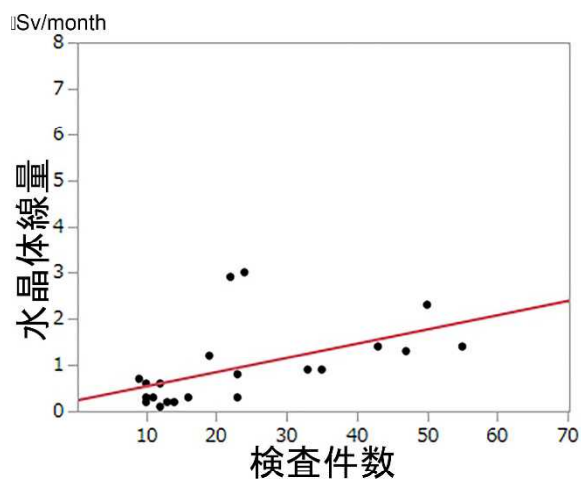
水晶体線量(Y) 対 照射回数(X)

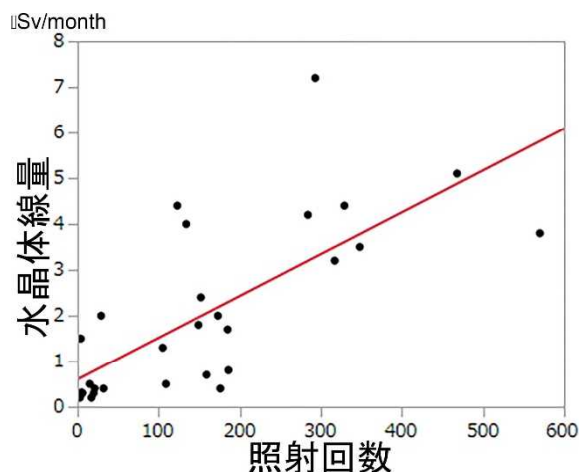
$$Y=0.00914X + 0.602 \quad (p<0.01, R^2=0.533)$$

照射時間および照射回数との相関が高い。

~~~~~

(期間 2：防護眼鏡装着：介入直後)





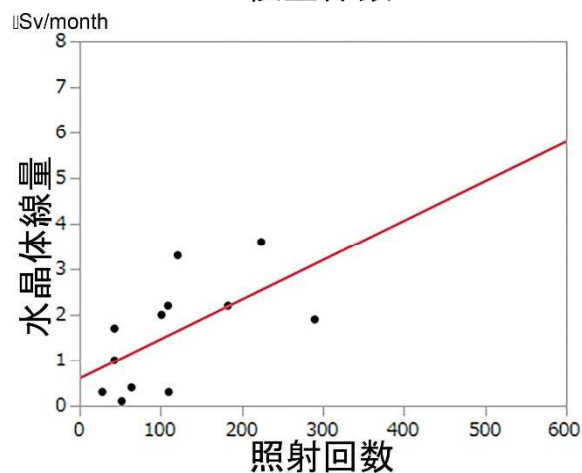
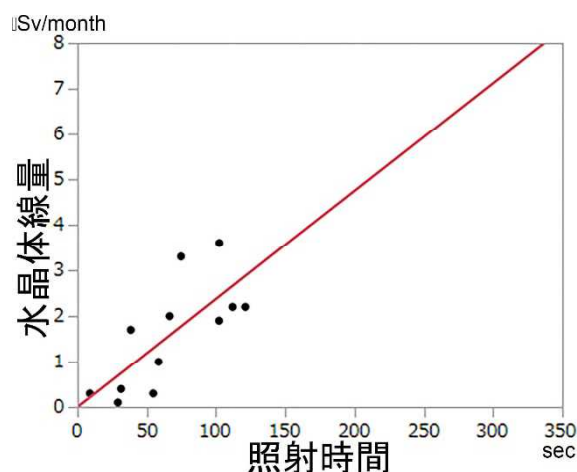
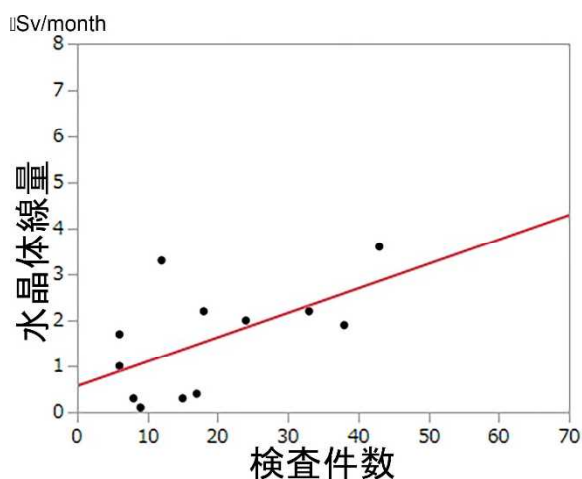
水晶体線量(Y) 対 検査件数(X)  
 $Y=0.0307X + 0.229$  ( $p<0.05$ ,  $R^2=0.274$ )

水晶体線量(Y) 対 照射時間(X)  
 $Y=0.0104X - 0.182$  ( $p<0.01$ ,  $R^2=0.647$ )

水晶体線量(Y) 対 照射回数(X)  
 $Y=0.00350X + 0.292$  ( $p<0.05$ ,  $R^2=0.289$ )

水晶体線量の減少とともに、検査件数・照射回数との相関性が低くなっている。  
 照射時間とは介入前と同様の高い相関。

~~~~~  
 (期間 3：防護眼鏡装着：介入半年後)



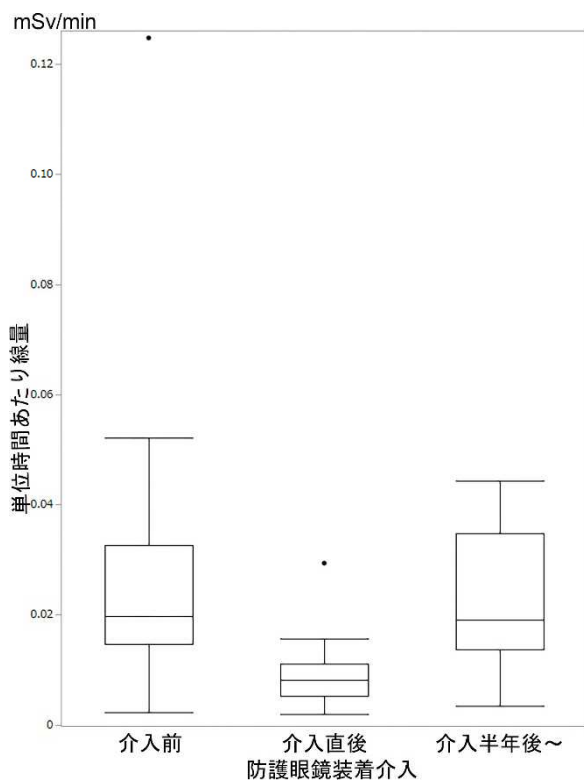
水晶体線量(Y) 対 検査件数(X)
 $Y=0.0532X + 0.569$ ($p=0.05$, $R^2=0.330$)

水晶体線量(Y) 対 照射時間(X)
 $Y=0.0237X + 0.000820$
 ($p<0.01$, $R^2=0.538$)

水晶体線量(Y) 対 照射回数(X)
 $Y=0.00867X + 0.595$ ($p<0.05$, $R^2=0.353$)

照射時間とは介入前と同様の高い相関。

防護眼鏡着用による介入の効果

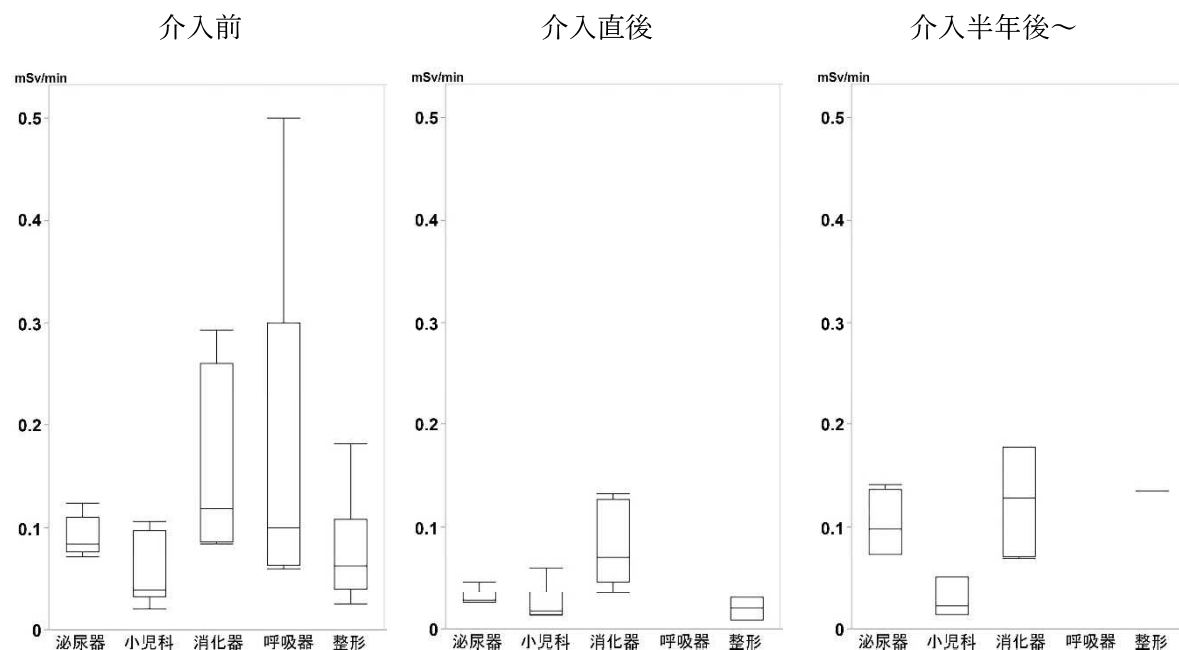


	介入前	介入直後	介入半年後
n	29	21	12
平均値	0.026	0.009	0.024
標準偏差	0.023	0.006	0.014
最大値	0.125	0.029	0.044
75%	0.033	0.011	0.035
中央値	0.020	0.008	0.019
25%	0.015	0.005	0.014
最小値	0.002	0.002	0.003

介入直後には、統計学的に有意 ($p < 0.01$) の線量低減効果が得られており、単位時間あたりの線量は約 1/3 に低下していたが、介入半年後には、介入の効果が失われ、単位時間線量は介入前に近い値となった。

介入が一過性のものであったため、防護眼鏡着用が徹底されなくなってしまったものと思われる。

診療科毎の違い



介入前	泌尿器科	小児科	消化器科	呼吸器科	整形外科
n	6	6	6	5	6
平均値	0.021	0.009	0.019	0.032	0.049
標準偏差	0.008	0.006	0.008	0.013	0.040
最大値	0.037	0.017	0.028	0.052	0.125
75%	0.025	0.016	0.028	0.043	0.068
中央値	0.019	0.006	0.018	0.032	0.041
25%	0.016	0.004	0.012	0.021	0.020
最小値	0.016	0.002	0.008	0.019	0.014

介入前には小児科が他 4 科に対して有意に低い被ばく量であった。(呼吸器科に対して $p<0.01$, 他は $p<0.05$)

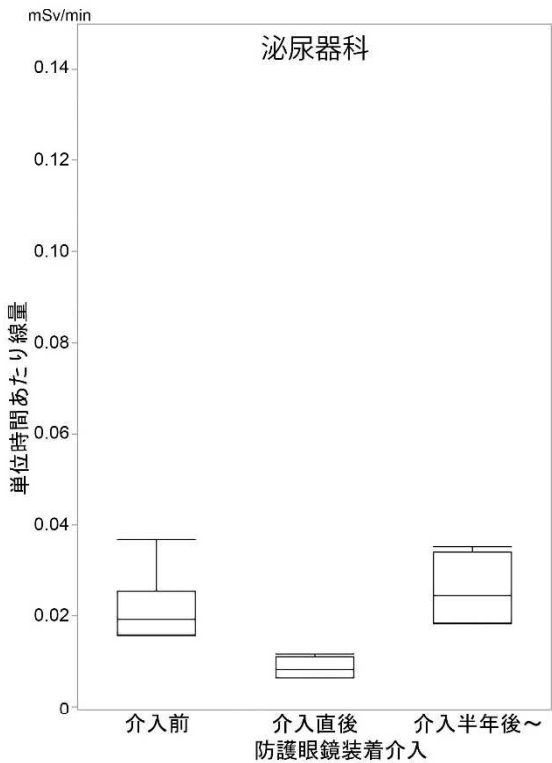
介入直後	泌尿器科	小児科	消化器科	呼吸器科	整形外科
n	6	6	6	-	3
平均値	0.009	0.005	0.011	-	0.014
標準偏差	0.002	0.003	0.004	-	0.014
最大値	0.012	0.009	0.016	-	0.029
75%	0.011	0.008	0.015	-	0.029
中央値	0.008	0.004	0.012	-	0.010
25%	0.006	0.003	0.007	-	0.002
最小値	0.006	0.002	0.005	-	0.002

介入半年後	泌尿器科	小児科	消化器科	呼吸器科	整形外科
n	4	3	4	-	1
平均値	0.026	0.007	0.031	-	0.034
標準偏差	0.008	0.005	0.015	-	-
最大値	0.035	0.013	0.044	-	0.034
75%	0.034	0.013	0.044	-	0.034
中央値	0.024	0.005	0.032	-	0.034
25%	0.018	0.003	0.018	-	0.034
最小値	0.018	0.003	0.017	-	0.034

介入後には、診療科間の有意差は消失した。なお、COVID-19 の影響のため、検査数が激減し、有意な値の得られない科・月が生じている。

科ごとの介入の影響

泌尿器科

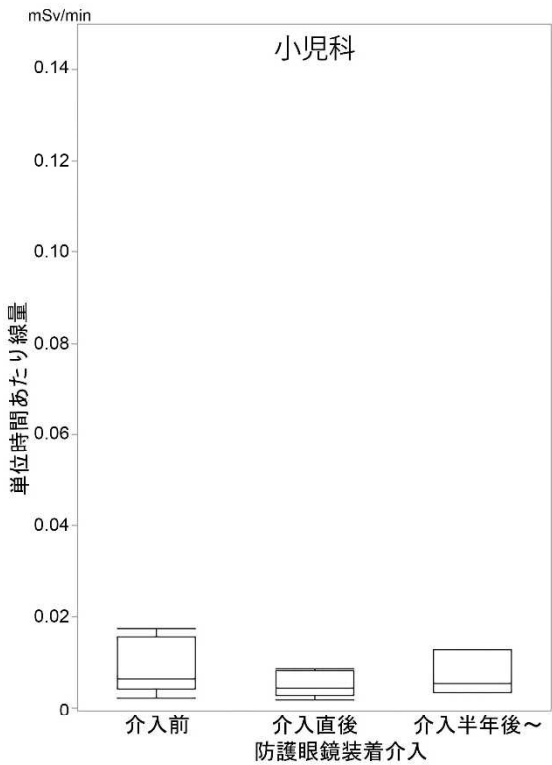


泌尿器科	介入前	介入直後	介入半年後
n	6	6	4
平均値	0.021	0.009	0.026
標準偏差	0.008	0.002	0.008
最大値	0.037	0.012	0.035
75%	0.025	0.011	0.034
中央値	0.019	0.008	0.024
25%	0.016	0.006	0.018
最小値	0.016	0.006	0.018

介入直後はそれ以外に対して有意に低い値（介入前に対して $p<0.01$ ，介入半年後に対して $p<0.05$ ）。

介入半年後のデータでは、介入前との有意さがなく、介入による効果が失われている。

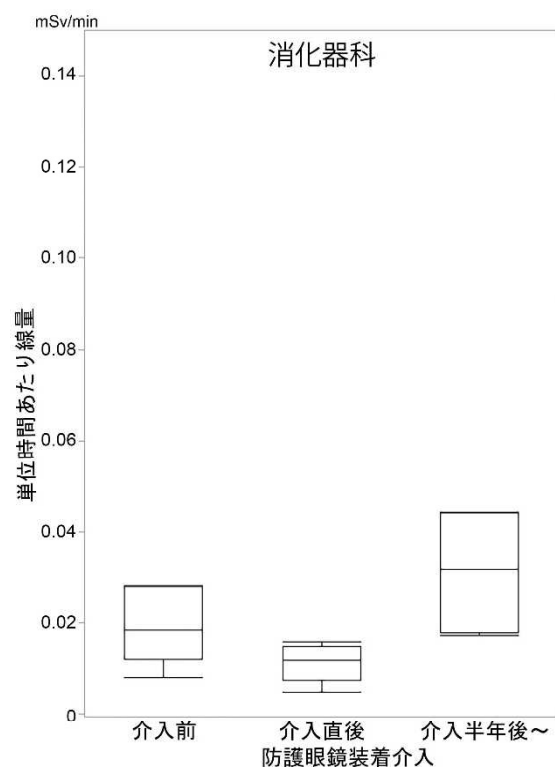
小児科



小児科	介入前	介入直後	介入半年後
n	6	6	3
平均値	0.009	0.005	0.007
標準偏差	0.006	0.003	0.005
最大値	0.017	0.009	0.013
75%	0.016	0.008	0.013
中央値	0.006	0.004	0.005
25%	0.004	0.003	0.003
最小値	0.002	0.002	0.003

介入直後にわずかに低下しているが、各期間毎の有意差は観察されない。

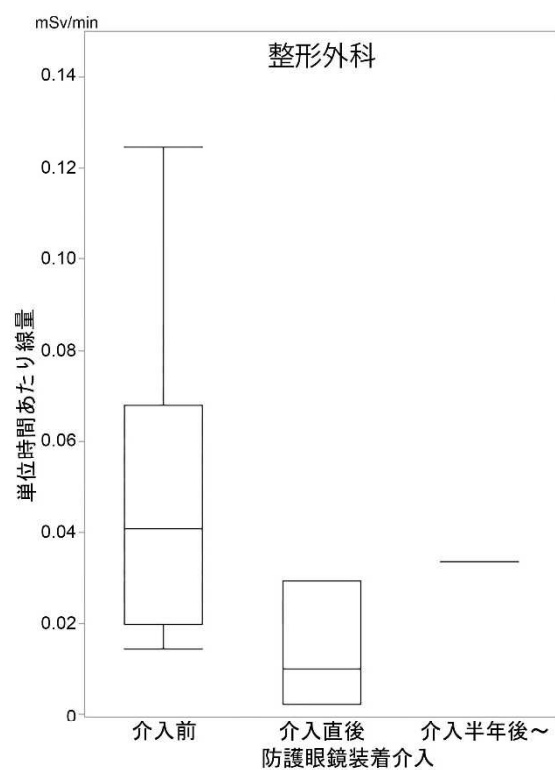
消化器科



消化器科	介入前	介入直後	介入半年後
n	6	6	4
平均値	0.019	0.011	0.031
標準偏差	0.008	0.004	0.015
最大値	0.028	0.016	0.044
75%	0.028	0.015	0.044
中央値	0.018	0.012	0.032
25%	0.012	0.007	0.018
最小値	0.008	0.005	0.017

介入直後に軽度低下しているが、介入半年で介入の効果が失われたため、介入直後に対して介入半年後が $p < 0.05$ で高くなっている。

整形外科

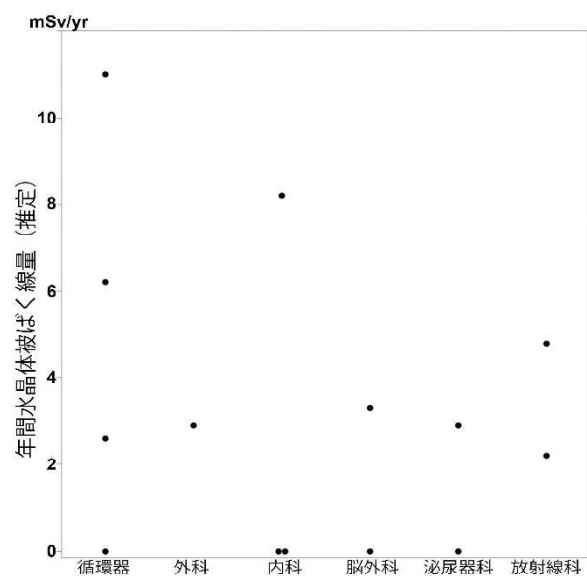
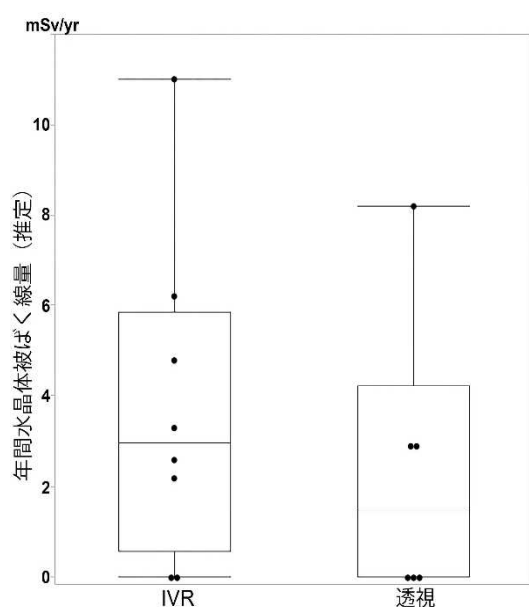


整形外科	介入前	介入直後	介入半年後
n	6	3	1
平均値	0.049	0.014	0.034
標準偏差	0.040	0.014	-
最大値	0.125	0.029	0.034
75%	0.068	0.029	0.034
中央値	0.041	0.010	0.034
25%	0.020	0.002	0.034
最小値	0.014	0.002	0.034

介入直後に低下しているように見えるが、有意差に至らない。ただし、COVID-19 未影響のため、検査数の顕著な減少があり、サンプル数が不足している。

高線量が推定される業務従事者における、水晶体個人被ばく線量調査

職種	所属	業務場所	7か月合計 (mSv)	1年 推定値	5年 推定値
放射線技師	画像診断部門	消化管造影	15	25.7	128.6
医師	循環器内科	IVR	6.4	11	54.9
医師	第1内科	透視	4.8	8.2	41.1
医師	循環器内科	IVR	3.6	6.2	30.9
医師	放射線診断科	IVR	2.8	4.8	24
医師	脳神経外科	IVR	1.9	3.3	16.3
医師	第1外科	透視	1.7	2.9	14.6
医師	泌尿器科	透視	1.7	2.9	14.6
医師	循環器内科	IVR	1.5	2.6	12.9
医師	放射線診断科	IVR	1.3	2.2	11.1
医師	循環器内科	IVR	0	0	0
医師	第1内科	透視	0	0	0
医師	第1内科	透視	0	0	0
医師	泌尿器科	透視	0	0	0
医師	脳神経外科	IVR	0	0	0



業務種毎の有意差は認められない。

所属科については、循環器がやや高い傾向があるが、サンプル数が少ないため、統計学的解析は行うことが出来ない。

医療従事者の 透視業務における 水晶体被ばくの実態と 防護眼鏡による防護効果

工藤 崇¹、西 弘大¹、福田直子¹、松田尚樹²
高村 昇³、増田真弓⁴、織内 昇⁵、伊藤 浩⁶、栗井和夫⁷

- 1 長崎大学原爆後障害医療研究所アイソトープ診断治療学研究分野
- 2 同、放射線生物・防護学分野
- 3 同、国際保健医療福祉学研究分野
- 4 長崎大学病院 看護部
- 5 福島県立医科大学 放射線医学講座
- 6 同、ふくしま国際医療科学センター先端臨床研究センター
- 7 広島大学 放射線診断科

目的

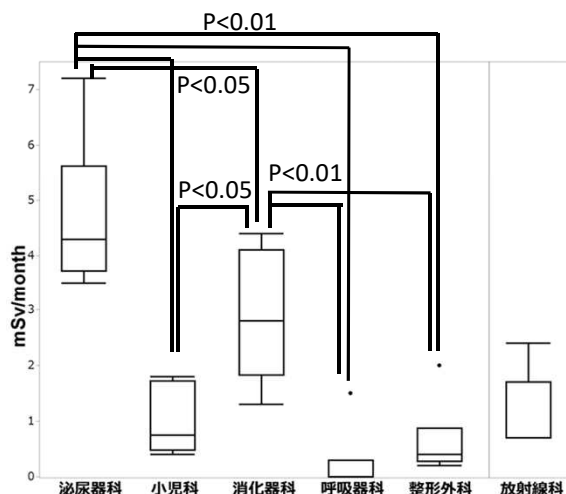
- 令和3年施行の改訂電離則では、ICRP勧告に基づき、職業被ばくにおける水晶体の線量限度が100mSv/5yr から50mSv/yrへと大幅に引き下げられた。
- この線量限度はかなりきびしい数字であるため、実際に臨床現場で対応可能であるかどうかは不明である。米国では対応困難としてICRP勧告の法への取り込みは行われていない。
- 医療現場で最も水晶体線量が問題となるのはX線透視作業を伴う業務と思われる。
- 目的：医療現場のX線透視を伴う検査について、実際の水晶体被ばく量を実測調査する。

方法

- X線透視を伴う業務を行う診療科、およびそれに立ち会う放射線技師、看護師に、水晶体個人線量測定器（DOSIRIS：千代田テクノル社製）を装着して作業してもらい、作業ごとの水晶体線量を測定する。
- たまたま、長崎大学では殆ど防護眼鏡の着用が行われていなかったため、半年の観察期間の後、防護眼鏡着用の介入を行い、線量を比較した。
- 対象となった科は、**X線透視業務**の多い、泌尿器科、小児科、消化器科、呼吸器科、整形外科、放射線科。
- 測定は個人ではなく業務ごとに行った。
 - 例えば泌尿器科の午前中のX線透視を医師Aが行い、午後は医師Bが行った場合、線量計は同じ線量計を連続・共有して測定する。



結果：防護眼鏡非着用期間の月間線量



最大1か月で7.2mSv/month
平均で1758±1.776mSv/month

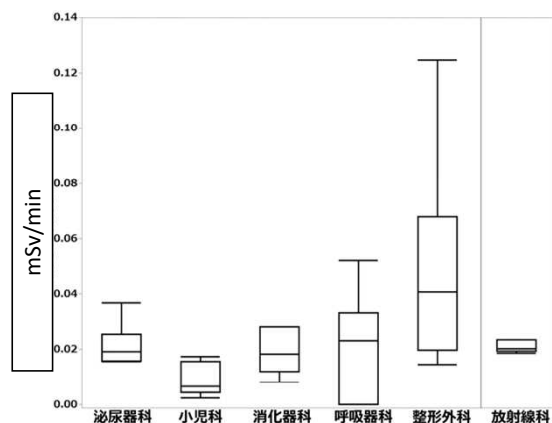
泌尿器科が、他科に比べて有意に高い。
また、消化器科も高い傾向



ただし、当然、検査回数、透視回数、透視時間に影響を受ける

	全体	泌尿器科	小児科	消化器科	呼吸器科	整形外科	(放射線科)
平均	1.758	4.700	0.986	2.883	0.371	0.633	1.100
標準偏差	1.776	1.342	0.611	1.197	0.511	0.677	0.738
最大	7.20	7.20	1.80	4.40	1.50	2.00	2.40
中央値	0.90	4.30	0.75	2.80	0.30	0.40	0.70
最小	0.20	3.50	0.40	1.30	0.00	0.20	0.70

結果：防護眼鏡非着用期間の単位透視時間あたりの線量



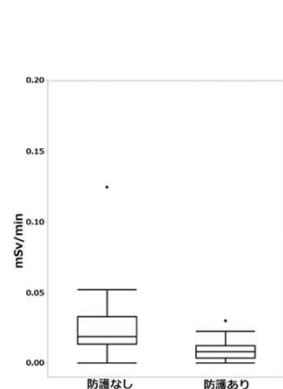
整形外科のみ、やや高めの値であったが、科ごとの大きな差は無い。



特定の科の検査のやり方に問題があるというわけではなく、単純に検査数が多いから被ばくが多くなるという問題である。

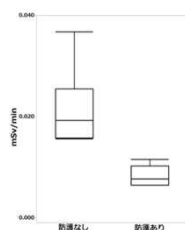
	全体	泌尿器科	小児科	消化器科	呼吸器科	整形外科	(放射線科)
平均	0.024	0.021	0.009	0.019	0.023	0.049	0.021
標準偏差	0.021	0.008	0.004	0.008	0.019	0.040	0.002
最大	0.12	0.04	0.02	0.03	0.05	0.12	0.02
中央値	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02
最小	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02

防護眼鏡着用の効果

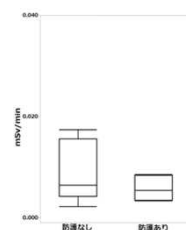


全体	防護無し	防護あり
平均	0.024	0.008
標準偏差	0.003	0.004

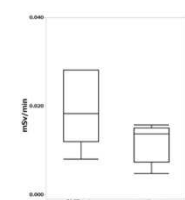
防護眼鏡着用により、大幅な線量低下が得られる(50%以下)



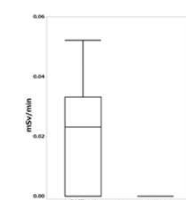
泌尿器科	防護無し	防護あり
平均	0.021	0.008
標準偏差	0.008	0.002



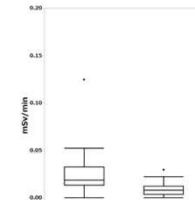
小児科	防護無し	防護あり
平均	0.009	0.006
標準偏差	0.006	0.003



消化器科	防護無し	防護あり
平均	0.019	0.008
標準偏差	0.012	0.004

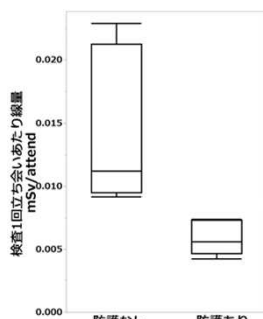


呼吸器科	防護無し	防護あり
平均	0.023	0
標準偏差	0.019	0

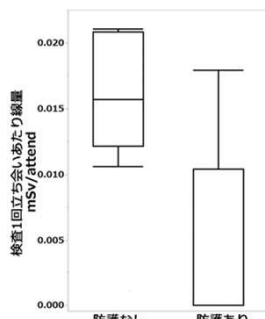


整形外科	防護無し	防護あり
平均	0.049	0.008
標準偏差	0.040	0.013

看護師・技師の被ばく



看護師/立ち会い数あたり		
看護師	防護無し	防護あり
平均	0.015	0.006
標準偏差	0.006	0.001



技師/立ち会い数あたり		
技師	防護無し	防護あり
平均	0.016	0.004
標準偏差	0.004	0.008

看護師・技師は複数の検査室にまたがって（渡り歩いて）検査の補助、立ち会いを行うため、透視時間などでの補正が困難であった。

このため検査立ち会い回数（入室回数）あたりの被ばく量で評価

- 技師、看護師も、防護眼鏡着用によって、大幅な被ばく低減が得られる。

考察

- X線透視業務による水晶体被ばくは予想外に高い。
 - 個人線量の測定ではないので、単純化はできないが、仮にこの透視業務を一人の医師が行ったとすれば、月間あたりの最大線量 $7.2\text{mSv} \times 12\text{月} = 86.4\text{mSv}$ であり、**年間50mSvを大幅に超える**。月間平均線量で計算しても、 $1.758\text{mSv} \times 12\text{月} \times 5\text{年} = 105.48$ で **100mSv/5年を超え**る。
- 防護眼鏡着用による線量低下は50%を超える可能性が高い。
 - 上記の計算でも、防護眼鏡を着用すれば、線量限度は遵守の範囲となる。

まとめ

- X線透視作業による医師・技師・看護師の被ばくは、予想を超えて高い。このため、現状では改正電離則の線量限度を超える危険性がある。
- 防護眼鏡の着用は、線量低下に大きな効果があり、線量限度遵守につながると考える。

**本研究は、厚生労働省 労災疾病臨床研究事業費補助金
「放射線業務従事医療関係者の職業被ばく実態調査と被ばく低減対策研究」（190701-01）の下で行われた**

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書 籍 名	出版社名	出版地	出版年	ページ

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
Masuda T, Funama Y, Nakaura T, Sato T, Muraoka Y, Okimoto T, et al.	The combined application of the contrast-to-noise index and 80 kVp for cardiac CTA scanning before atrial fibrillation ablation reduces radiation dose exposure.	Radiography (Lond)	27	840-846	2021
Masuda T, Funama Y, Nakaura T, Sato T, Tahara M, Takei Y, et al.	Use of Vacuum Mattresses Can Reduce the Absorbed Dose during Pediatric CT.	Radiat Prot Dosimetry	194	201-207	2021
Nakamura Y, Narita K, Higaki T, Akagi M, Honda Y, Awai K.	Diagnostic value of deep learning reconstruction for radiation dose reduction at abdominal ultra-high-resolution CT.	Eur Radiol.	31	4700-4709	2021
Sekino H, Ishii S, Kuroiwa D, Fujimaki H, Sugawara S, Suenaga H, et al.	Usefulness of Model-Based Iterative Reconstruction in Brain CT as Compared With Hybrid Iterative Reconstruction.	J Comput Assist Tomogr.	45	600-605	2021