Steve Wing, Associate Professor, Department of Epidemiology, School of Public Health, University of North Carolina, steve_wing@unc.edu

Erklärung vor dem Unterausschuss für Energie und Umwelt des Wissenschaftsausschusses des Repräsentantenhauses der Vereinigten Staaten von Nordamerika am 18.Juli 2000 [1]

Herr Vorsitzender, Mitglieder des Ausschusses, ich danke Ihnen, dass Sie mich eingeladen haben, um über die gesundheitlichen Auswirkungen niedrig dosierter Strahlung auszusagen.

Ich bin Epidemiologe an der Fakultät der Universität von North Carolina. Dort habe ich die Strahlenwirkung auf die Nuklearbeiter von Oak Ridge, Los Alamos, Hanford und Savannah River untersucht. Meine Studien wurden vom Department of Energie und vom Department of Health and Human Services finanziert. Die Epidemiologie, das Studium von Erkrankungen in menschlichen Populationen, ist besonders wichtig für die Risikoabschätzung und für die Grenzwertsetzung, denn Tierstudien und Untersuchungen an Laborsystemen machen die Extrapolation von hohen zu niedrigen Dosen, von Molekülen und Zellen zu Organismen und von anderen Spezies auf den Menschen erforderlich [1-3].

Wir wissen, dass ionisierende Strahlung Krebs und vererbbare Mutationen auslösen kann durch Schädigung der DNA. Obwohl Epidemiologen hoch und niedrig strahlenexponierte Populationen untersucht haben, hat die Risikoextrapolation von hohen zu niedrigen Dosen zu einer heftigen Debatte darüber geführt, ob eine gradlinige Extrapolation, also das lineare schwellenfreie Model, den Sachverhalt angemessen wiedergibt.

In meinen Ausführungen werde ich mich auf drei Punkte beschränken:

> Die gegenwärtigen Krebsrisiko-Abschätzungen sind um einen Faktor zehn oder mehr zu niedrig.
>
> Die gegenwärtigen Sicherheitsstandards bieten weder für Nuklearbeiter noch für die Öffentlichkeit einen angemessenen Schutz.
>
> Die wissenschaftlichen Beweise dafür, dass es keine Grundlage für eine weitere Aufweichung der Strahlenschutzstandards gibt, sind zahlreich und werden ständig größer.

---

[1] Übersetzt von Prof. Dr. Wolfgang Köhnlein, Münster, kohnlei@uni-muenster.de

Extrapolation von Studien im hohen Dosisbereich

Bei Hochdosis-Studien untersucht man spezielle Populationen einschließlich Patientenkollektive, die einer Strahlentherapie ausgesetzt waren. Die bei weitem einflussreichsten sind die an den Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki durchgeführten Studien. Sie sind gegenwärtig die primäre Basis für die Abschätzung des Krebsrisikos. Sie bilden sozusagen den Goldstandard, an dem alle anderen epidemiologischen Studien exponierter Populationen gemessen werden. Die Atombombenstudien sind jedoch verfälscht aufgrund selektiven Überlebens, schlechter Dosisermittlung und störenden Expositionen [4-7].

Die Atombombenexplosionen führten zu einer großen Zahl von sofort Toten, aber auch zu vielen verzögerten Todesfällen auf Grund der schädigenden Wirkung der Strahlung, infektiöser Epidemien und der Zerstörung der sozialen Strukturen, der Nahrungsversorgung und der medizinischen Dienste [8]. Nur die Widerstandsfähigsten und Gesündesten überlebten diese Bedingungen. Das gilt besonders für die sehr jungen und für die alten Menschen in der betroffenen Bevölkerung. Als dann im Jahr 1950 eine Liste der Überlebenden für die Langzeitstudie erstellt wurde, waren die besonders Strahlenempfindlichen bereits verstorben. Der sogenannte Healthy-Survivor-Effekt führt zu einer Unterschätzung des Risikos besonders bei den in utero exponierten, bei Kindern und älteren Erwachsenen [6].

Der Nachweis von strahlenbedingten Risiken hängt von der Fähigkeit ab, im Rahmen einer epidemiologischen Studie die Personen entsprechend ihrer Exposition zu klassifizieren. Die Atombombenüberlebenden trugen keine Strahlendosimeter, daher musste ihre Strahlenbelastung abgeschätzt werden. Dazu fragte man die 1950 noch Überlebenden nach ihrem Aufenthaltsort zum Zeitpunkt der Bombenexplosion, nach möglichen Abschirmungen und anderen Strahlenschäden. Zusätzlich zu den typischen Fehlern der inkorrekten Erinnerung an zurückliegende traumatische Ereignisse, die bei jeder nachträglichen Datenerhebung passieren, kommt noch die Stigmatisierung und soziale Ausgrenzung der Überlebenden, die dazu führte, dass sie ihren tatsächlichen Aufenthaltsort zum Zeitpunkt der Explosion nur ungern mitteilten [9]. Akute Strahlenschäden wie Verlust der Haare und Verbrennungen bei Überlebenden, die berichteten, sie wären weit entfernt von Epizentrum gewesen [10,11] deuten die Größe dieser Fehler in der Dosisabschätzung an, die zu einer Unterschätzung des Strahlenrisikos führen.

Eine weitere Verfälschung kommt hinzu, weil die Überlebenden in größerem Abstand vom Epizentrum einer höheren Reststrahlung ausgesetzt waren. Auch hat der Fallout die entfernt Überlebenden in beiden Städten stärker betroffen [8, 12]. Weiter kommt erschwerend hinzu, dass Überlebende, die

abgeschirmt oder in größerem Abstand exponiert worden waren, physisch stark genug waren, wenige Stunden nach der Explosion in die Gebiete des Hypozentrums zu gehen. Dabei haben sie sich der Reststrahlung der Atombombe ausgesetzt [8, 12-14]. Diese Reststrahlungsexposition der mit niedrigen Dosen belasteten Überlebenden führt zu einer Unterschätzung des Strahlenrisikos.

Direkte Beobachtungen mit Studien im niedrigen Dosisbereich

Im Jahr 1956 berichteten Dr. Alice Steward und ihre Kollegen in der Zeitschrift *The Lancet*, dass vorgeburtliche Exposition während geburtshilflicher Röntgenuntersuchungen mit einer erhöhten Kinderkrebsrate in Verbindung gebracht werden können [15]. Der Fötus ist besonders strahlenempfindlich wegen der schnellen Zellteilung. Stewarts Beobachtungen wurden in zahlreichen anderen Niederdosis-Studien bestätigt [6, 16-18]. Die Standards für medizinische Praxis verlangen heute, dass kleine Strahlendosen, wie sie bei einer einzigen Röntgenaufnahme absorbiert werden können, während der Schwangerschaft zu vermeiden sind.

Langzeitstudien über Krebs unter den Nuklearbeitern begannen erstmals in den 70-er Jahren in den wissenschaftlichen Fachzeitschriften zu erscheinen. Damals berichteten Mancuso, Stewart und Kneale, dass kleine Strahlendosen, im höheren Alter absorbiert, die Krebsraten unter den Arbeitern der Plutonium-Produktionsfabrik in Hanford, im Staate Washington, erhöht [19].

Wissenschaftler des Manhattan Projekts realisierten bereits 1940, dass die Arbeiter in den Nuklearwaffenfabriken einer speziellen Gesundheitsgefährdung ausgesetzt sind, und sie errichteten eine einmalige Datenquelle für Gesundheitsstudien bei einigen der Einrichtungen des Manhattan-Projekts, indem sie jeden Mitarbeiter mit einem Personendosimeter ausrüsteten, das in der Sicherheitsplakette inkorporiert war und bei der Arbeit getragen werden musste. Obwohl die Dosisaufzeichnungen für viele Nuklearbeiter und Veteranen unvollständig und teilweise fehlerhaft sind, so gibt es doch mehrere Langzeitstudien von den gut überwachten Arbeitern in nuklearen Anlagen in den USA, England und Kanada. Trotz der Tatsache, dass die Nuklearbeiter im allgemeinen gesunde Erwachsene sind, haben viele dieser Langzeitstudien eine Korrelation zwischen niedrig dosierter Bestrahlung und Krebstodesfällen besonders unter den älteren Arbeitern ergeben. Diese größere Empfindlichkeit der älteren Erwachsenen gegenüber ionisierender Strahlung wurde bei den Atombombenstudien nicht beobachtet, wahrscheinlich wegen der selektiven Auslese der Resistentesten. Diese Beobachtung ist jedoch in Übereinstimmung mit Studien, die eine Reduktion der Immunfunktionen und Abnahme der DNA Reparatur mit zunehmendem Alter zeigen [6, 20].

Risikoabschätzungen, wie sie sich aus vielen epidemiologischen Studien von am Arbeitsplatz exponierten Personen ergeben, sind ungefähr Zehnmal höher als die auf den Atombomben-Überlebenden beruhenden Abschätzungen [21-33]. Dies zeigt, dass die gegenwärtigen Strahlenschutzstandards zu lax und nicht ausreichend sind.

In unserer jüngsten Untersuchung über multiple Myelome unter den Nuklearbeitern von Oak Ridge, Hanford, Los Alamos und Savannah River wurden Dosen zwischen 50 und 100 mSv mit einem dreifach erhöhten Risiko und Dosen über 100 mSv mit einem fünffach erhöhten Risiko in Zusammenhang gebracht [33]. Keiner der Fälle von multiplen Myelom hatte eine registrierte Dosis höher als der derzeitige zulässige US-Grenzwert von 50 mSv/a für beruflich exponierte Personen.

Aus England kommen Berichte, wonach eine präkonzeptionelle Exposition des Vaters mit erhöhtem Risiko für Krebs im Jugendalter, mit einer Zunahme der Totgeburten und mit einem Überschuss an männlichen Geburten korrelierbar ist [34-36]. Die Fähigkeit ionisierender Strahlung, vererbbare genetische Veränderungen in einem Versuchstier zu induzieren, ist seit den zwanziger Jahren bekannt [37]. Die neuen Berichte legen es nahe, dass kleine Strahlendosen, appliziert in der Zeit vor der Konzeption, zu genetischen Effekten in den menschlichen Nachkommen führen.

Nachweise einer genetischen Instabilität nach Bestrahlung mit Alphateilchen haben große Bedeutung für karzinogene und vererbbare genetische Effekte [38-40].

Die Überzeugung, Strahlenrisiken bei kleinen Dosen könnten aus den Studien bei hohen Dosen, abgeleitet werden, führte dazu, dass einige Wissenschaftler vorhersagten, ein strahlenbedingtes Krebsrisiko sei bei Nuklearbeitern nicht nachweisbar. Obwohl sich diese Vermutung als falsch erwiesen hat, haben einige Forscher die Daten von verschiedenen Populationen von Nuklearbeiter zusammengefasst, in der Hoffnung durch Vergrößerung der Stichprobe auch die Aussagegenauigkeit über das Risiko ebenfalls zu vergrößern [41-43]. Unglücklicherweise führt das Zusammenfassen von Populationen, belastet mit unterschiedlichen Strahlenarten, unterschiedlichen Expositionsbedingungen und Qualitäten der Messwerterfassung und verschiedenen Kriterien der Auswahl und des Einsatzes der Arbeiter nur zu einer scheinbaren Verbesserung der statistischen Präzision, es verdünnt aber gleichzeitig die Effekte der Strahlung [43].

Krankheiten und genetische Mutationen, die strahleninduziert sind, tragen kein Erkennungszeichen, das ihren Ursprung verrät. Daher schauen die Epidemiologen nach zusätzlichen Erkrankungsfällen in den mit hohen Dosen belasteten Populationen. Es ist jedoch ganz leicht, eine epidemiologische Studie zu entwerfen, die nicht in der Lage ist, Effekte von Umwelt- oder Arbeitsplatz-bedingten Strahlenexpositionen im niedrigen Dosisbereich nachzuweisen. Nur unter speziellen Bedingungen, etwa bei den sehr genau dokumentierten Belastungen der Nuklearbeiter oder bei speziellen medizinischen Expositionen [44] ist es überhaupt möglich, die niedrigen Dosen zu quantifizieren und das daraus folgende Risiko anzugeben. Die Empfindlichkeit epidemiologischer Studien ist

beeinträchtigt, weil man die Menschen im allgemeinen für die Zeit zwischen ihrer Exposition und dem Manifestwerden der Erkrankung nicht verfolgen kann und weil medizinische Informationen, es sei denn die Todesursache, für eine Bevölkerung ohne umfassende medizinische Versorgung im allgemeinen nicht verfügbar sind. Es ist daher falsch, auf Grund von Studien ohne gewissenhafte Erfassung der Strahlendosis und genauer Registrierung des medizinischen Resultats, zu schließen, niedrig dosierte Strahlenbelastung sei ungefährlich. Unglücklicherweise wurden genau solche Schlüsse aus Studien gezogen, die auf der geographischen Variation der natürlichen Hintergrundstrahlung basieren [45].

Weiterhin haben einige Wissenschaftler fälschlicherweise behauptet, es gebe keine Hinweise für strahleninduzierte Gesundheitsschäden unterhalb eines willkürlich gelegten Dosisniveaus. Solche Verlautbarungen ignorieren nicht nur die medizinische Literatur über *in utero* und am Arbeitsplatz exponierte Menschen, sie sind auch Beweis für ein grundlegendes Missverständnis der epidemiologischen Arbeitsmethoden. Um das von einem Gefahrstoff ausgehende Risiko zu entdecken, untersuchen die Epidemiologen einen breiten Expositionsbereich. So vergleichen wir zum Beispiel die Lungenkrebsraten der Nichtraucher mit den Raten der Menschen, die weniger als eine Packung pro Tag, eine Packung pro Tag , zwei Packungen pro Tag und drei oder mehr Packungen pro Tag rauchen. Es wäre nun falsch die Daten der Menschen, die nur eine Zigarette pro Tag rauchen, abzutrennen und zu behaupten, wenig rauchen ist ohne gesundheitliche Folgen. Schlussfolgerungen über die gesundheitliche Auswirkung von schädlichen Agenzien wie Strahlung und Zigarettenrauch dürfen nur aus Beobachtungen nach unterschiedlichen Expositionen gezogen werden.

Der gegenwärtige Erkenntnisstand

Mit dem Wachsen des Erkenntnisstandes über die ionisierende Strahlung wurden auch gesundheitliche Beeinträchtigungen aus Aktivitäten beobachtet, die noch bis vor kurzem als sicher und ungefährlich betrachtet wurden. Trotz zurückliegender Versicherungen über die Sicherheit der Nuklearwaffentests hat das National Cancer Institut mit seinen neueren Studien erkennen lassen, dass Zehntausende von amerikanischen Bürgern an Schilddrüsenkrebs erkranken werden wegen nur eines der bei den atmosphärischen Atombombentests freigesetzten Radionuklide [46]. Die Tatsache, dass Strahlenschutzstandards reduziert wurden, während gleichzeitig wissenschaftliche Studien über Effekte im niedrigen Dosisbereich vermehrt publiziert werden, ist ein weiterer Grund der Besorgnis [7].

obwohl die ICRP bereits 1990 empfohlen haben, für Nuklearbeiter den Jahresgrenzwert von 50 mSv auf 20 mSv zu reduzieren, erlauben die US Behörden auch weiterhin für Nuklearbeiter eine

um den Faktor 2,5 höhere Strahlenbelastung als sie in Kanada und den Ländern der Europäischen Union, die den internationalen Standard angenommen haben, gesetzlich zulässig ist.

Das atomare Zeitalter ist gerade ein halbes Jahrhundert alt. Obwohl viel über Strahlung in dieser Zeit erforscht und gelernt wurde, so gibt es doch noch sehr viel, das erst noch verstanden werden muss, besonders bezüglich der Effekte auf die Gesundheit des Menschen. Es wird immer deutlicher, dass es eine große Variabilität in der Empfindlichkeit der Menschen auf niedrige Strahlendosen gibt. Hier spielen Faktoren wie Alter, genetische Suszeptibilität, Belastung durch andere Schadstoffe und Ernährungsgewohnheiten eine Rolle. Entscheidungen über die zulässigen Expositionsstandards sollten die speziellen Risiken der Jungen, Alten und der mit einer genetischen Disposition berücksichtigen. Öffentliche Gesundheit und moralische Prinzipien fordern, dass wir die Schwächsten schützen.

Wie umfassend durch das von Admiral Watkins ernannte “Secretarial Panel for the Evaluation of Epidemiological Research” [47], durch das von Präsident Clinton berufene “Advisory Committee on Human Radiation Experiments” [48], der Expertengruppe der “Ärzte für Soziale Verantwortung" [49] und zahlreiche Publikationen in der wissenschaftlichen Literatur [50-54] dokumentiert, wurde der wesentliche Teil der wissenschaftlichen Erkenntnis über die gesundheitliche Schädigung ionisierender Strahlung wegen Sicherheitsbedenken und öffentlichem Ansehen der Experten verschleiert. In ihrem Report aus dem Jahr 1995 bemerkt das “Advisory Committee on Human Radiation Experiments” des US Präsidenten, “Mitte der 60-er Jahre wurde die Möglichkeit, dass eine Fortführung der Datensammlung die Atomic Energy Commission (AEC) in noch größere Schwierigkeiten bringen kann, zum Auslöser, keine weitern Studien durchzuführen (“not to study at all”) [48]. Dieses Klima hat bis in die jüngste Zeit die Forschung beeinträchtigt [51, 52]. Im Fall der gesetzlichen Festsetzung von Strahlenschutzstandards, die die Gesundheit der Nuklearbeiter und der Öffentlichkeit schützen sollen, müssen die politischen Entscheidungsträger den wissenschaftlichen Erkenntnisstand und die Zeugenaussagen mit der Einschränkung berücksichtigen, dass die Wissenschaftler bei der vollen Untersuchung der Effekte niedrig dosierter ionisierender Strahlung behindert wurden.

Die gegenwärtigen Strahlenschutzstandards reichen nicht aus, Arbeiter und Öffentlichkeit angemessen zu schützen, selbst wenn man die fehlerhaften Risikoabschätzungen der Atombombenstudien zugrunde legt. Selbst der GAO-Report von 1994 (Government Accounting Office) über nukleare Gesundheit und Sicherheit stellt fest, Expositionen, wie sie durch die gegenwärtigen Richtlinien der “Nuclear Regulatory Commission” und des “Department of Energy” zulässig sind, würden nach Aussage eben dieser Agenturen in der allgemeinen Bevölkerung pro 300 zu einem vorzeitigen Krebstodesfall führen und bei Nuklearbeitern sogar bei jedem Achten [55]. Für kein anderes Karzinogen gibt es solche nachlässigen Standards.

Ich fordere die Mitglieder des Kongresses und der Verordnungen gebenden Agenturen mit großem Nachdruck auf, Weitsicht und Sorgfalt walten zu lassen, um Gesundheit und Leben der Öffentlichkeit und zukünftige Generationen zu schützen, die durch heutige Entscheidungen über Produktion und Entsorgung nuklearen Materials betroffen sein werden.

Literatur

1. **National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation. Health effects of exposure to low levels of Ionizing Radiation (BEIR V). Washington, DC:National Academy Press, 1990.**
2. **International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, vol 21. Oxford:Pergamon Press, 1991.**
3. **United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. New York:United Nations, 1993.**
4. **Stewart A. Detection of late effects of ionizing radiation: why deaths of A-bomb survivors are so misleading. Int J Epidemiol. 14:52-56(1985).**
5. **Stewart A. A-bomb data: detection of bias in the life span study cohort. Environmental Health Perspectives 105:1519-21(1997).**
6. **Stewart A. The role of epidemiology in the detection of harmful effects of radiation. Environmental Health Perspectives 108:93-96(2000).**
7. **Wing S, Richardson D, Stewart A. The relevance of occupational epidemiology to radiation protection standards. New Solutions 9:133-151(1999).**
8. **Committee for the Compilation of Materials on Damage Caused by the Atomic Bombs in Hiroshima and Nagasaki. Hirosima and Nagasaki: The physical, medical, and social effects of the atomic bombings. Tokyo:Iwanami Shoten, Publishers, 1981.**
9. **Lindee MS. Suffering made real: American science and the survivors at Hiroshima. Chicago, Ill.:University of Chicago Press, 1994.**
10. **Neriishi K, Stram DO, Vaeth M, Mizuno S, Akiba S. The observed relationship between the occurrence of acute radiation effects and leukemia mortality among A-bomb survivors. Radiat Res. 125:206-213(1991).**
11. **Neriishi K, Wong FL, Nakashima E, Otake M, Kodama K, Choshi K. Relationship between cataracts and epilation in atomic bomb survivors. Radiation Research 144:107-13(1995).**
12. **Rabbitt Roff S. Hotspots: The Legacy of Hiroshima and Nagasaki. London:Cassell, 1995.**
13. **Rabbitt Roff S. Residual radiation in Hiroshima and Nagasaki. Lancet 348(1997).**
14. **Yamahata Y. Nagasaki Journey: The photographs of Yosuke Yamahata. Rohnert Park, CA:Pomegranate, 1995.**
15. **Stewart AM, Webb J, Giles D, Hewitt D. Malignant diseases in childhood and diagnostic irradiation *in utero*. Lancet 2:447(1956).**
16. **Doll R, Wakeford R. Risk of childhood cancer from fetal irradiation [see comments]. British Journal of Radiology 70:130-9(1997).**
17. **McMahon B. Prenatal X-ray exposure and childhood cancer. Journal of the National Cancer Institute 28:1173(1962).**

18. **Bithell JF, Stewart AM. Pre-natal irradiation and childhood malignancy: a review of British data from the Oxford Survey. British Journal of Cancer 31:271-87(1975).**
19. **Mancuso TF, Stewart A, Kneale G. Radiation exposures of Hanford workers dying from cancer and other causes. Health Physics 33:369-385(1977).**
20. **Moriwaki S-I, Ray S, Tarone R, Kraemer K, Grossman L. The effect of donor age on the processing of UV-damaged DNA by cultured human cells: Reduced DNA repair capacity and increased DNA mutability. Mutation Research 364:117-123(1996).**
21. **Beral V, Fraser P, Carpenter L, Booth M, Brown A, Rose G. Mortality of employees of the Atomic Weapons Establishment, 1951-82. British Medical Journal 297:757-70(1988).**
22. **Kneale GW, Mancuso TF, Stewart AM. Hanford Radiation Study III: A Cohort Study of the Cancer Risks from Radiation to Workers at Hanford (1944-77 deaths) by the Method of Regression Models in Life-tables. BJIM 38:156-166(1981).**
23. **Kneale GW, Stewart AM. Reanalysis of Hanford data: 1944-1986 deaths. American Journal of Industrial Medicine 23:371-89(1993).**
24. **Kneale GW, Stewart AM. Factors affecting recognition of cancer risks of nuclear workers. Occupational & Environmental Medicine 52:515-23(1995).**
25. **Richardson DB, Wing S. Greater sensitivity to radiation exposures at older ages among workers at Oak Ridge National Laboratory: Follow-up through 1990. International Journal of Epidemiology 28:428-436(1999).**
26. **Richardson D, Wing S. Radiation and mortality among workers at Oak Ridge National Laboratory: Positive associations for doses received at older ages. Environmental Health Perspectives 107:649-656(1999).**
27. **Ritz B, Morganstern H, Moncau J. Age at exposure modifies the effects of low-level ionizing radiation on cancer mortality in an occupational cohort. Epidemiology 10:135-140(1999).**
28. **Ritz B, Morganstern H, Froines J, Young B. Effects of exposure to external ionizing radiation on cancer mortality in nuclear workers monitored for radiation at Rocketdyne/Atomics International. American Journal of Industrial Medicine 35:21-31(1999).**
29. **Ritz B. Radiation exposure and cancer mortality in uranium processing workers. Epidemiology 10:531-538(1999).**
30. **Wing S, Shy CM, Wood JL, Wolf S, Cragle DL, Frome EL. Mortality among workers at Oak Ridge National Laboratory: Evidence of radiation effects in follow-up through 1984. JAMA 265:1397-402(1991).**
31. **Wing S, Shy CM, Wood JL, Wolf S, Cragle DL, Tankersley W, Frome EL. Job factors, radiation and cancer mortality at Oak Ridge National Laboratory: follow-up through 1984. American Journal of Industrial Medicine 23:265-79(1993).**
32. **Wing S. A Review of Recent Findings on Radiation and Mortality at Oak Ridge National Laboratory. In: Neue Bewertung des Strahlenrisikos (Lengfelder E, Wendhauser H, eds). Munich:Medizin Verlag, 1993;217-228.**
33. **Wing S, Richardson D, Wolf S, Mihlan G, Crawford-Brown D, Wood J. A case control study of multiple myeloma at four nuclear facilities. Annals of Epidemiology 10:144-153(2000).**
34. **Gardner M, et al. Results of case-control study of leukaemia and lymphoma among young people near Sellafield nuclear plant in West Cumbria. British Medical Journal 300:423-429(1990).**

35. Parker L, Pearce M, Dickenson H, Aitkin M, Craft A. Stillbirths among offspring of male radiation workers at Sellafield nuclear reprocessing plant. The Lancet 354:1407-14(1999).
36. Dickinson HO, Parker L, Binks K, Wakeford R, Smith J. The sex ratio of children in relation to paternal preconceptional radiation dose: a study in Cumbria, northern England. Journal of Epidemiology & Community Health 50:645-52(1996).
37. Muller HJ. Artificial transmutation of the gene. Science 66:84-87(1927).
38. Khadim MA, MacDonald DA, Goodhead DT, Lorimore SA. Transmission of chromosome instability after plutonium alpha particle irradiation. Nature 355(1992).
39. Morgan WF, Day JP, Kaplan MI, McGhee EM, Limoli CL. Genomic instability induced by ionizing radiation. Radiation Research 146:247-258(1996).
40. Watson GE, Lorimore SA, G. WE. Long-term in-vivo transmission of alpha particle-induced chromosomal instability in murine haemopoietic cells. Int J Radiat Biol 69:175-182(1996).
41. Cardis E, Gilbert ES, Carpenter L, Howe G, Kato I, Armstrong BK, Beral V, Cowper G, Douglas A, Fix J, Fry SA, Kaldor J, Lave C, Salmon L, Smith PG, Voelz GL, Wiggs LD. Effects of low doses and low dose rates of external ionizing radiation: cancer mortality among nuclear industry workers in three countries [see comments]. Radiation Research 142:117-32(1995).
42. Gilbert ES, Cragle DL, Wiggs LD. Updated Analyses of Combined Mortality Data for Workers at the Hanford Site, Oak Ridge National Laboratory, and Rocky Flats Weapons Plant. Radiation Research 136:408-421(1993).
43. Frome EL, Cragle DL, Watkins JP, Wing S, Shy CM, Tankersley WG, West CM. A mortality study of employees of the nuclear industry in Oak Ridge, Tennessee. Radiation Research 148:64-80(1997).
44. Preston-Martin S, Thomas DC, White SC, Cohen D. Prior exposure to medical and dental x-rays related to tumors of the parotid gland. Journal of the National Cancer Institute 80:943-9(1988).
45. Cohen B. Test of the linear no-threshold theory of radiation carcinogenesis for inhaled radon decay products. Health Physics 68:157-174(1995).
46. National Cancer Institute. Estimated Exposures and Thyroid Doses Received by the American People from Iodine-131 in Fallout Following Nevada Atmospheric Nuclear Bomb Tests NIH Publication No. 97-4264. Washington, DC: US Department of Health and Human Services, Natinoal Institutes of Health, National Cancer Institute, 1997.
47. Secretarial Panel for the Evaluation of Epidemiologic Research Activities. Report to the Secretary by the Secretarial Panel for the Evaluation of Epidemiologic Research Activities for the U.S. Department of Energy. Washington, DC: US Department of Energy, 1990.
48. Advisory Committee on Human Radiation Experiments. Final Report, Advisory Committee on Human Radiation Experiments. Washington, DC:US Government Printing Office, 1995.
49. Geiger HJ, Rush D, Michaels D. Dead Reckoning: A critical review of the Department of Energy's Epidemiologic Research. Washington, DC: Physicians for Social Responsibility, 1992.
50. Morgan KZ. Health physics: its development, successes, failures, and eccentricities. American Journal of Industrial Medicine 22:125-33(1992).
51. Lyon J. Nuclear weapons testing and research efforts to evaluate health effects on exposed populations in the United States. Epidemiology 10:557-560(1999).

52. **Wilkinson G. Seven years in search of alpha: The best of times, the worst of times. Epidemiology 10(1999).**
53. **Sterling TD. The health effects of low-dose radiation on atomic workers: a case study of employer-directed research. International Journal of Health Services 10:37-46(1980).**
54. **Greenberg M. The evolution of attitudes to the human hazards of ionizing radiation and to its investigators. American Journal of Industrial Medicine 20:717-721(1991).**
55. **Government Accounting Office. Nuclear Health and Safety: Consensus on acceptable radiation risk to the public is lacking GAO/RCED-94-190. Washington, DC: United States General Accounting Office, 1994.**