



Radioprotezione e Nucleare

Ing. Francesco Mancini

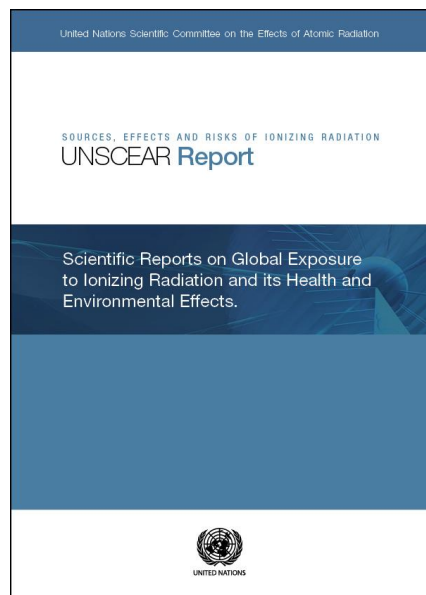
*Presidente Associazione Italiana di
Radioprotezione (AIRP)*

6 Marzo | Palazzo San Giorgio - Sala del Capitano - Via della Mercanzia, 2 - Genova

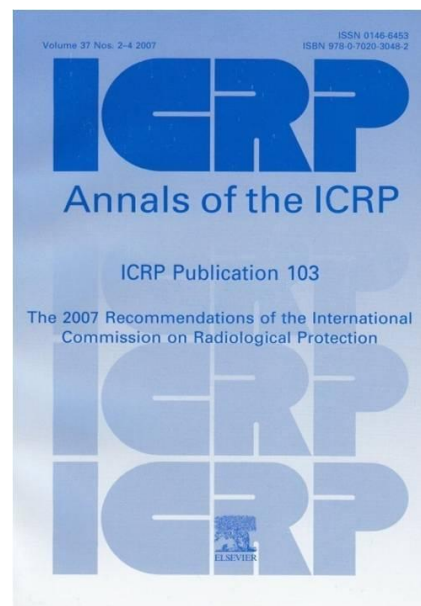
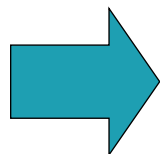
Indice

- **Raccomandazioni Internazionali**
- **Basi legali della radioprotezione**
- **Sistema Internazionale di Radioprotezione**
- **Esposizione popolazione e lavoratori**
- **Nucleare e Radioprotezione**
- **Aspetti di Radioprotezione per Nuovi Impianti Nucleari**

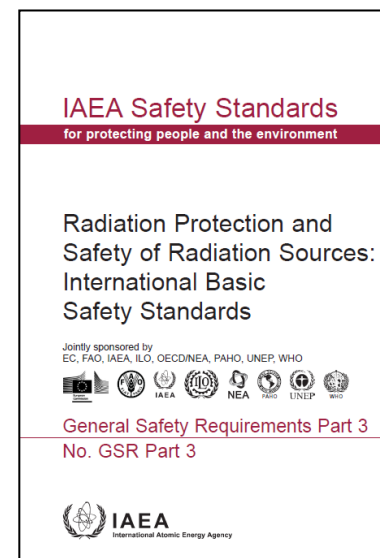
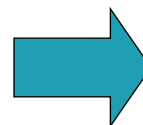
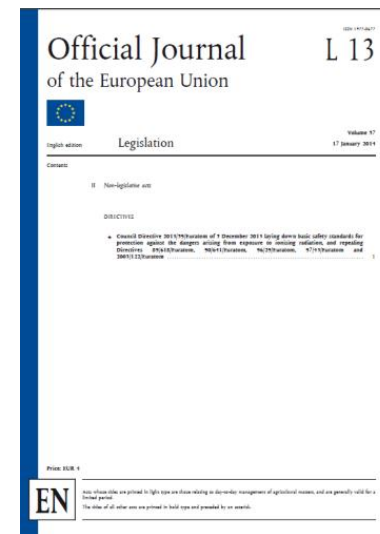
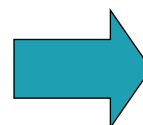
Raccomandazioni Internazionali



Effetti delle Radiazioni



Raccomandazioni di protezione



**Requisiti
Essenziali**
(obbligo legale)

Trattato EURATOM (1957)

- **Art. 2:** definisce l'obbligo di stabilire norme di sicurezza per la protezione di lavoratori e popolazione.
- **Art. 30:** introduce le norme fondamentali, tra cui:
 - ✓ limiti di dose ammissibili,
 - ✓ limiti di esposizione e contaminazione,
 - ✓ principi di sorveglianza sanitaria.

Evoluzione normativa europea

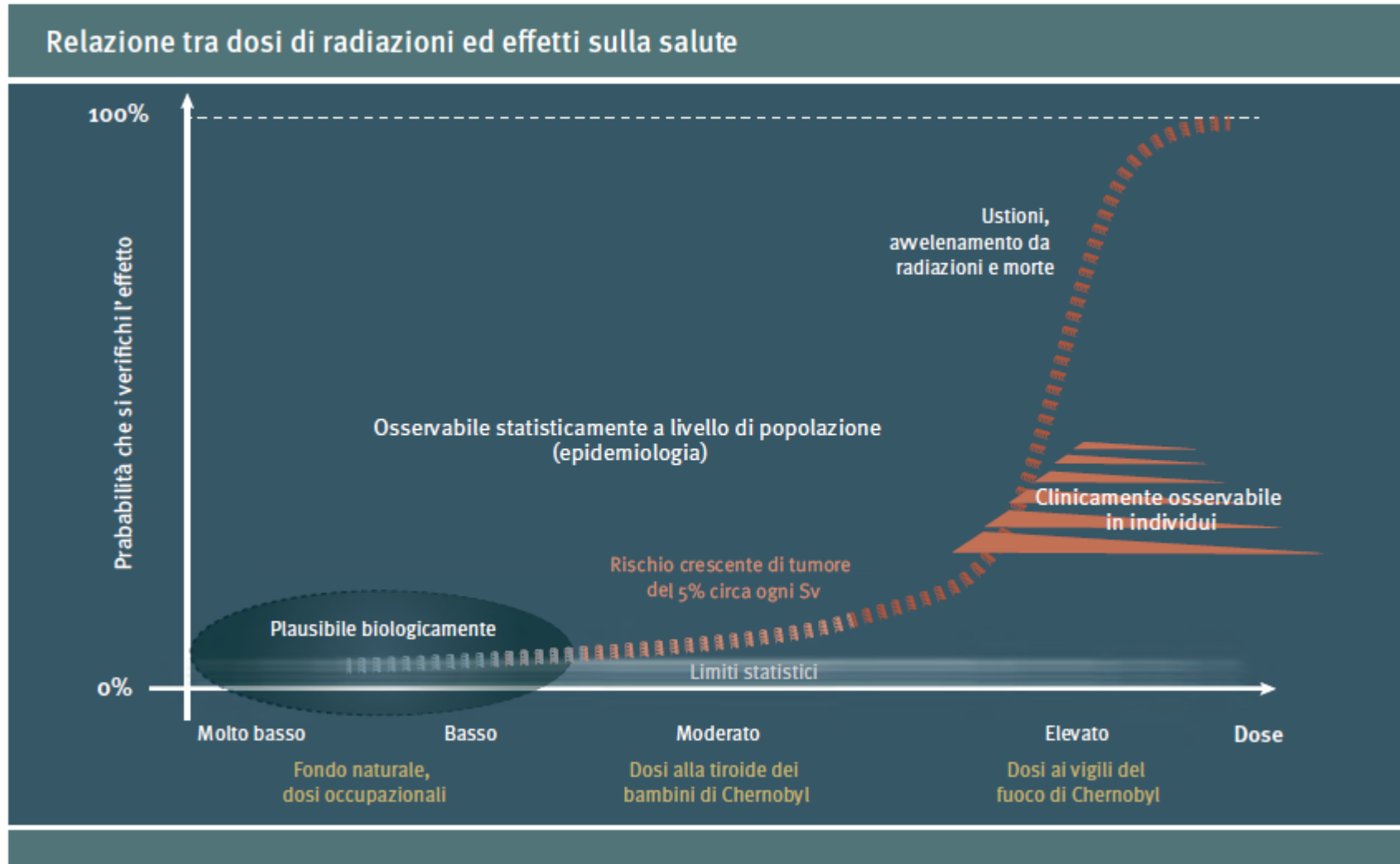
- Prima Direttiva: 1959
- Attuali Basic Safety Standards: **Direttiva 2013/59/EURATOM**

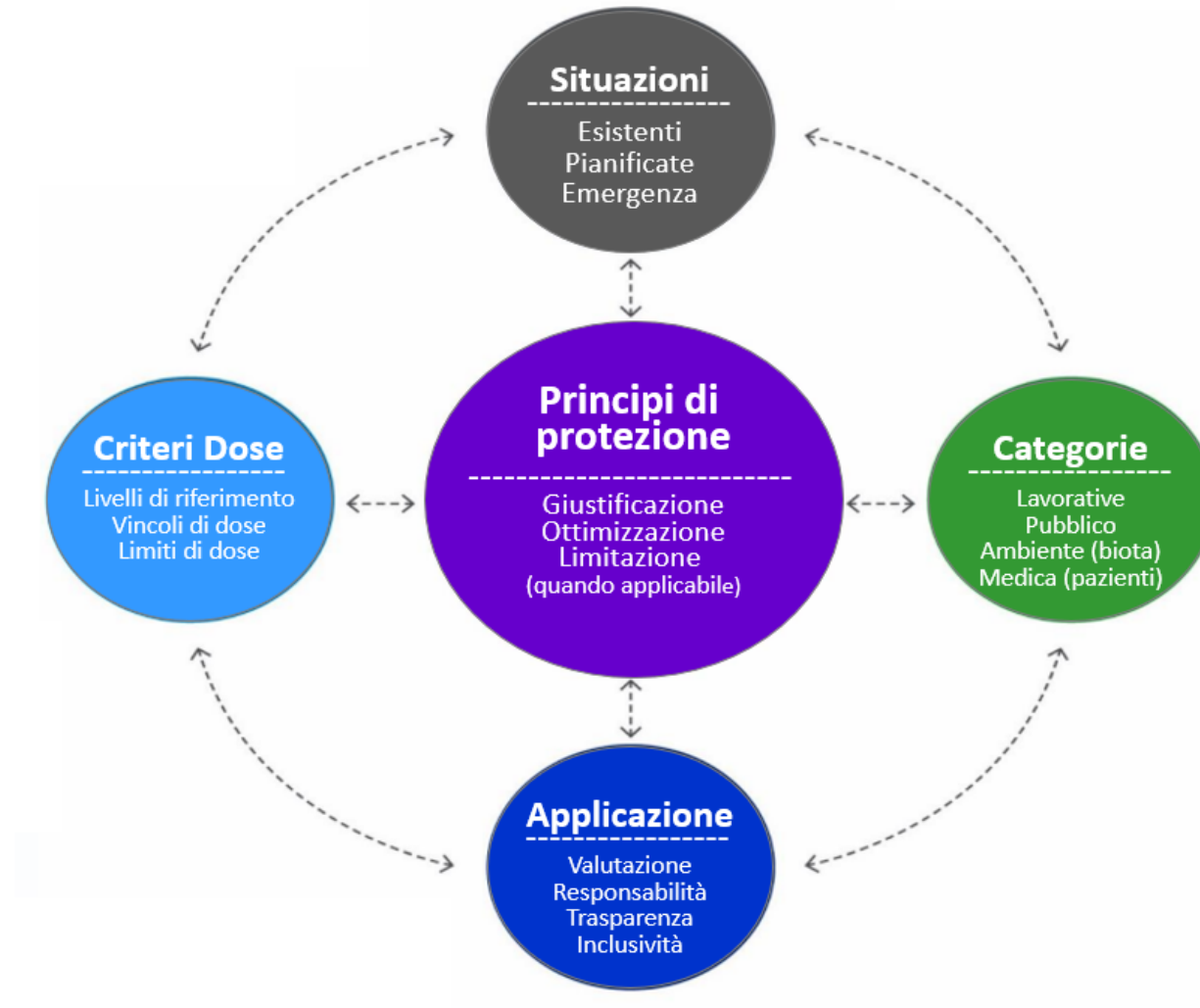
Recepimento in Italia

- **D.Lgs. 101/2020:** recepisce la Direttiva 2013/59/EURATOM e riordina la normativa nazionale sulla radioprotezione.

- L'obiettivo del Sistema di Radioprotezione è di contribuire a un **livello adeguato di protezione** dagli effetti dannosi dell'esposizione alle radiazioni ionizzanti senza limitare in modo indebito i benefici associati all'uso delle radiazioni
- Questo si realizza attraverso delle raccomandazioni che hanno lo scopo di **prevenire gravi effetti dannosi ai tessuti** e **minimizzare**, in modo ragionevole, le probabilità di **effetti stocastici**, tra cui il cancro e gli effetti ereditari
- Le basi delle raccomandazioni provengono da informazioni di tipo scientifico, dall'esperienza e da valori sociali ed etici

UNEP booklet
"Radiation: Effects
and Sources"

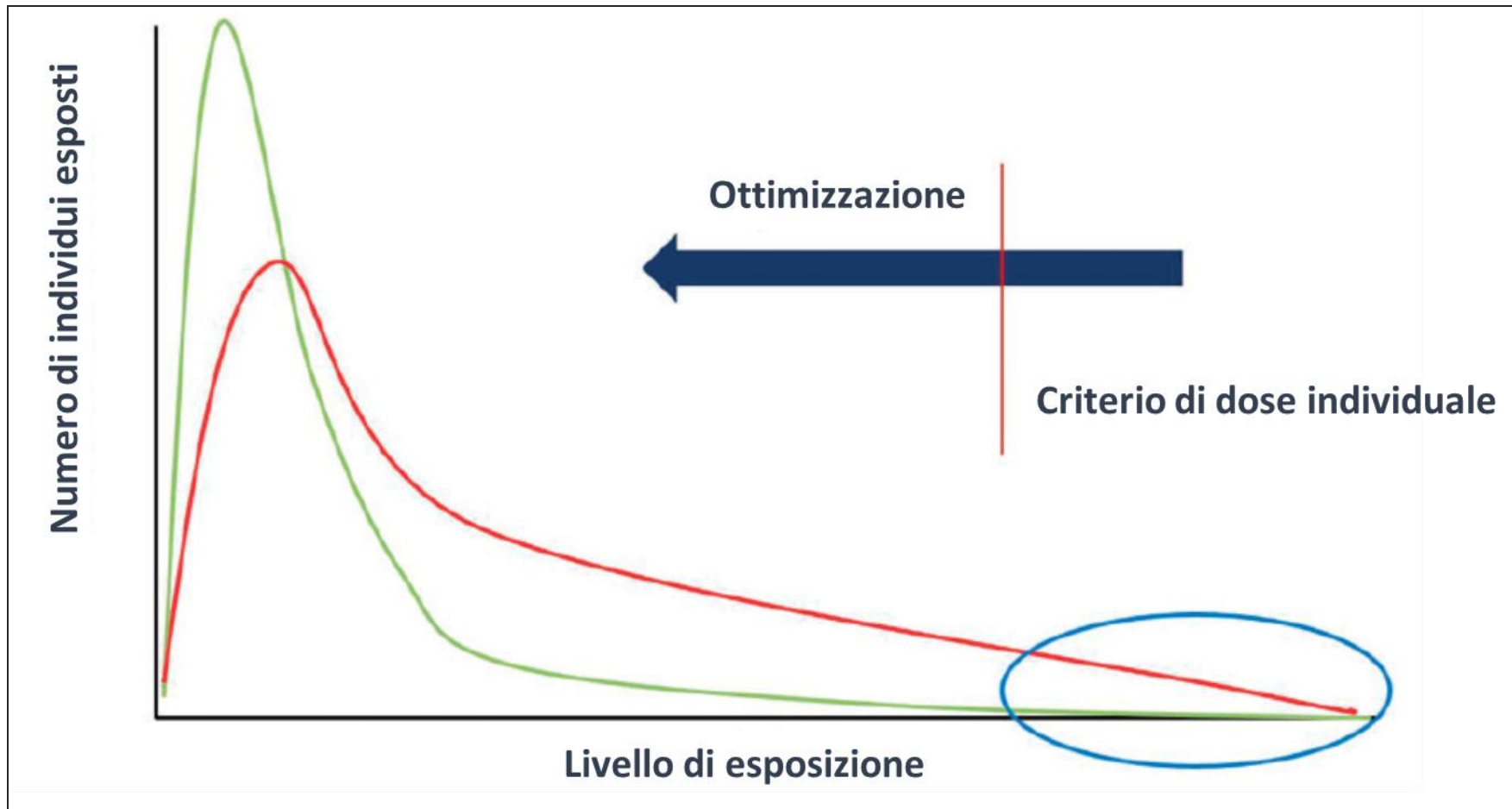




- Il sistema di radioprotezione della **ICRP** (**I**nternational **C**ommission of **R**adiation **P**rotection) è stato sviluppato gradualmente nel corso del XX secolo, integrando gli sviluppi delle conoscenze sugli effetti delle radiazioni ionizzanti, l'evoluzione dei valori etici e sociali e l'esperienza accumulata nella sua attuazione pratica
- Al centro del sistema di radioprotezione si trovano i **tre principi**: **giustificazione**, **ottimizzazione** e **limitazione**
- Questi principi vengono applicati nelle varie **situazioni di esposizione**: **pianificate**, **esistenti** e di **emergenza**
- Esistono quattro **categorie di esposizione**: **professionale**, **pubblico**, **medica** ed **ambientale**

- **Giustificazione:** Ogni decisione che introduce o modifica una pratica deve essere giustificata, assicurando che i **benefici** per i singoli o per la collettività siano **superiori ai possibili effetti negativi** sulla salute. Questo principio si applica anche alle situazioni di esposizione esistenti e di emergenza.
- **Ottimizzazione:** La radioprotezione deve essere ottimizzata in modo da mantenere le dosi individuali, la probabilità di esposizione e il numero di persone esposte al **livello più basso ragionevolmente possibile**, tenendo conto delle conoscenze tecniche disponibili e dei fattori economici e sociali.
- **Limitazione delle dosi:** Nelle situazioni di esposizione pianificate, la dose totale ricevuta da un individuo non deve superare **i limiti stabiliti per i lavoratori e per la popolazione**. Le esposizioni mediche non sono soggette a limiti di dose.

Ottimizzazione



Esposizioni

Grandezze di radioprotezione

- $D_T = \frac{\epsilon_m}{m_T}$
- unità di misura [J/Kg]
- nome speciale **gray** (Gy)

- $E = \sum w_T \times H_T$
- w_T : fattore ponderazione tessuto
- unità di misura **sievert** (Sv)

Dose
assorbita
D

Dose
assorbita
media organo
o tessuto
 $D_{T,R}$

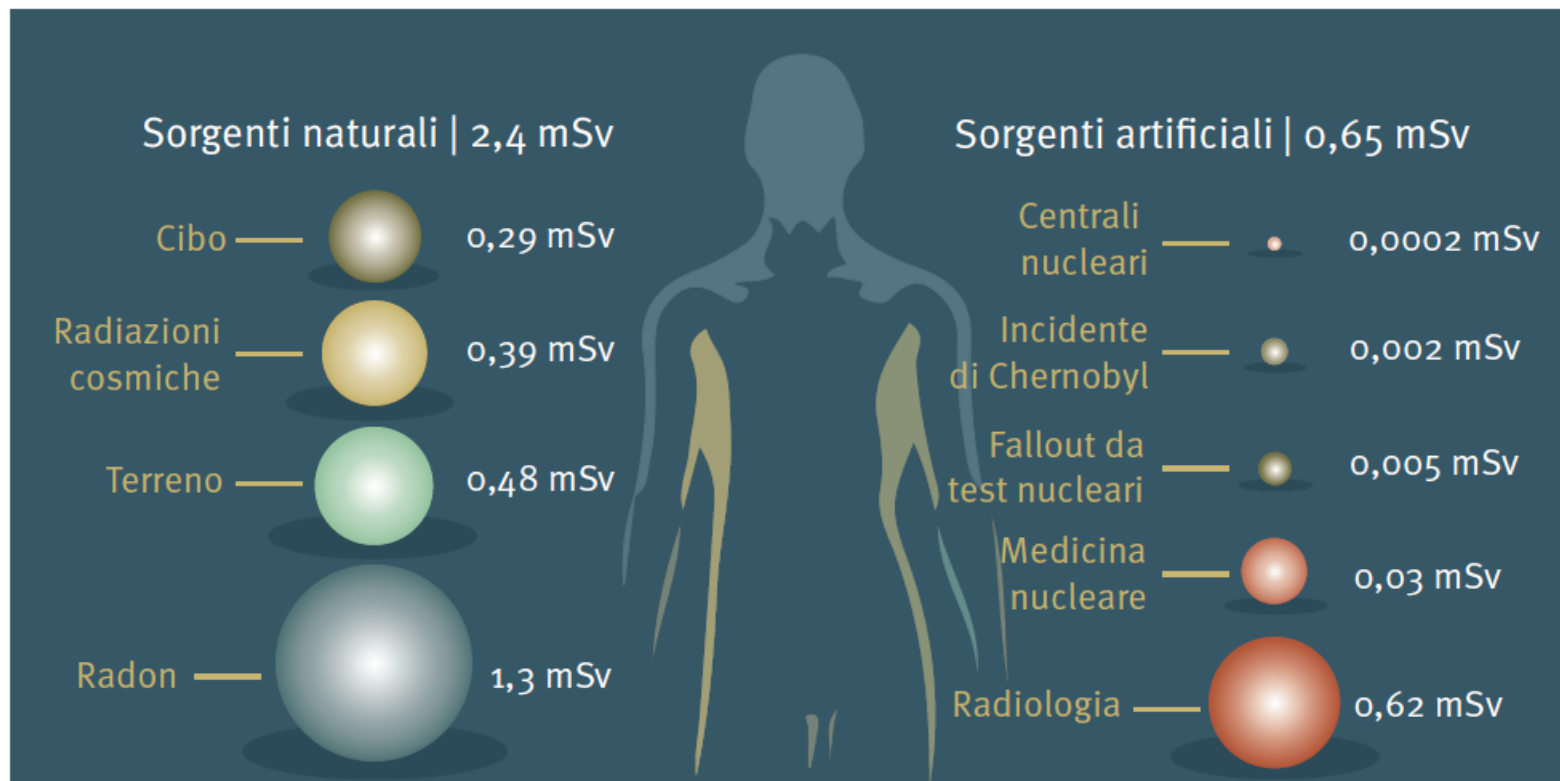
Dose
equivalente in
organo o
tessuto
 H_T

Dose Efficace
E

- $D = \frac{dE}{dm}$
- unità di misura [J/Kg]
- nome speciale **gray** (Gy)

- $H_T = w_R \times D_T$
- w_R : fattore ponderazione radiazioni
- unità di misura **sievert** (Sv)

Esposizione media della popolazione a sorgenti di radiazioni*



* Stime arrotondate della dose efficace ad una persona in un anno (media mondiale).

UNEP booklet
"Radiation: Effects
and Sources"

Tabella 5,2

ICRP n. 147 Use of Dose Quantities in Radiological Protection

Table 5.1. Examples of typical effective doses (mSv) for adults in three countries from some common examinations.

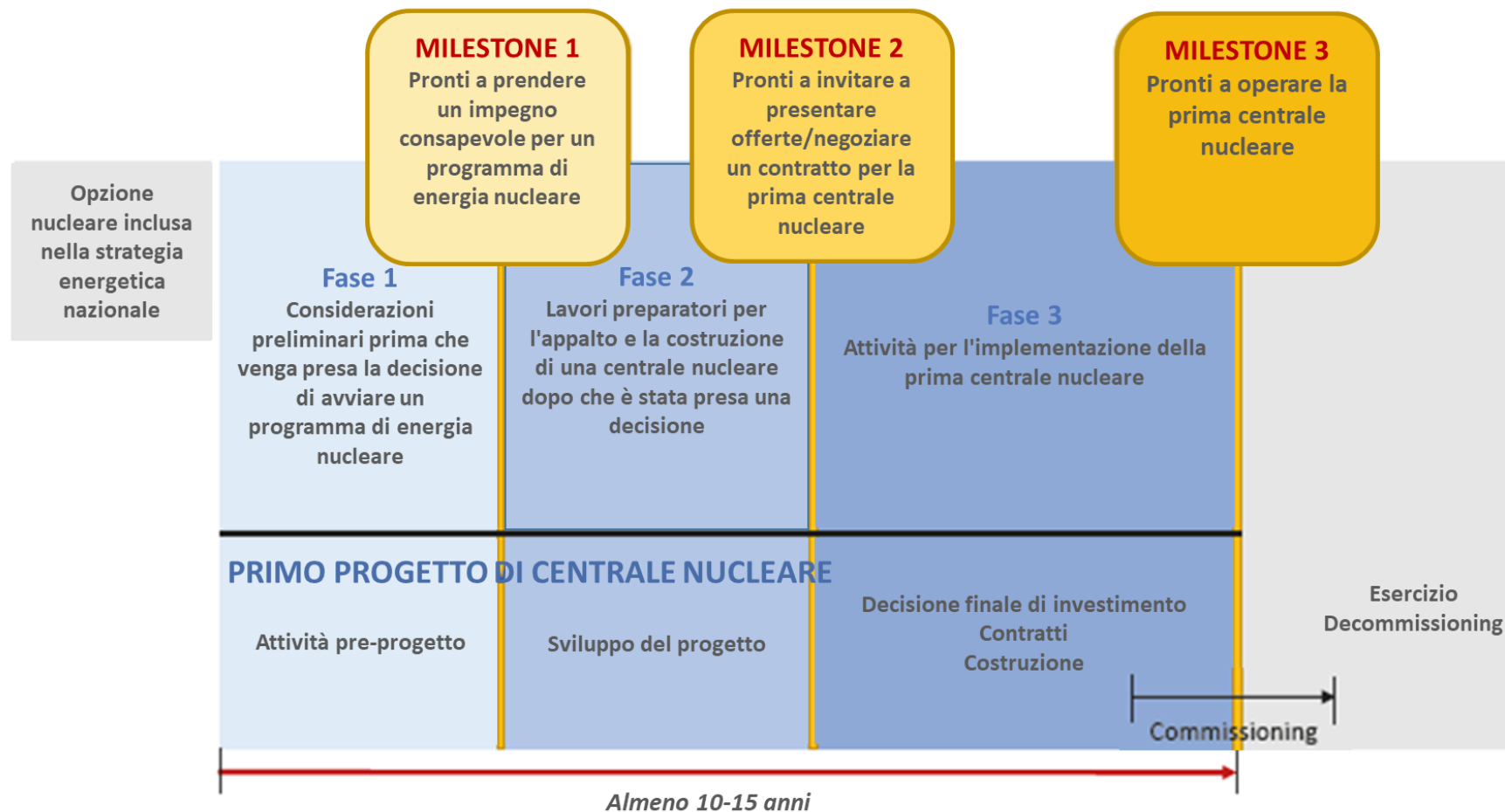
Procedure	UK*	USA†	Russian Federation‡
<i>Radiography</i>			
Chest PA	0.01	0.03	0.1
Chest Lat	0.04	0.07	0.18
Lumbar spine AP	0.39	2.0	0.6
Lumbar spine Lat	0.21	–	0.6
Abdomen AP	0.43	0.6	1.0
Pelvis AP	0.28	0.4	0.7
<i>Interventional</i>			
Coronary angiography	3.9	15	15
Femoral angiography	2.3	7	5–10
<i>Computed tomography</i>			
CT head	1.8	1.6	1.8
CT chest	14	6.1	6.3
CT abdomen	16	–	9
CT abdomen + pelvis	13	7.7	–
CT chest + abdomen + pelvis	19	12	25
<i>Nuclear medicine</i>			
Bone scan: ^{99m} Tc	3	4	3
PET whole-body tumour imaging (¹⁸ F FDG)§	7.6	13	5

Table 48. Estimated worldwide occupational exposure due to human-made sources of radiation

Sectors	1975–1979	1980–1984	1985–1989	1990–1994	1995–1999	2000–2004	2005–2009	2010–2014
NUMBER OF MONITORED WORKERS (10 ³)								
Nuclear fuel cycle	560	800	888	800	670	652	660	762
Medical	1 280	1 890	2 220	2 320	7 440			9 000
Industrial	530	690	560	700	790	870	1040	1 100
Miscellaneous	140	180	160	360	476	446	482	540
Total	2 820	3 910	4 228	4 600	9 754			11 400
AVERAGE ANNUAL COLLECTIVE EFFECTIVE DOSE (man Sv)								
Nuclear fuel cycle	2 300	3 000	2 500	1 400	1 000	602	523	483
Medical	1 000	1 140	1 030	760	3 540			4 500
Industrial	870	940	510	360	315	348	419	440
Miscellaneous	70	40	20	40	53	38	34	38
Total	4 660	5 370	4 310	2 660	4 960			5 460
AVERAGE ANNUAL EFFECTIVE DOSE (mSv)								
Nuclear fuel cycle	4.4	3.7	2.6	1.8	1.4	0.9	0.8	0.6
Medical	0.8	0.6	0.5	0.3	0.5			0.5
Industrial	1.6	1.4	0.9	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4
Miscellaneous	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Total	1.7	1.3	1	0.6	0.5			0.5

Tabella 48
UNSCEAR 2020/2021
 VOLUME IV
 Scientific Annex D

Nucleare e Radioprotezione



Sviluppo dell'infrastruttura nazionale per un programma nucleare

(IAEA Nuclear Energy Series No. NG-G-3.1 (Rev. 2), IAEA, Vienna (2024), <https://doi.org/10.61092/iaea.zjau-e8cs>)

I 19 temi infrastrutturali

1. Posizione Nazionale	11. Coinvolgimento <i>Stakeholder</i>
2. Sicurezza Nucleare	12. Sito e impianti di supporto
3. Management	13. Protezione ambientale
4. Fondi e schemi di finanziamento	14. Preparazione e risposta all'emergenza
5. Quadro legislativo	15. Security nucleare
6. Salvaguardie e non proliferazione	16. Ciclo combustibile nucleare
7. Quadro regolamentare	17. Gestione rifiuti radioattivi
8. Radioprotezione	18. Coinvolgimento dell'industria
9. Rete Energetica	19. Acquisizione impianto nucleare
10. Sviluppo risorse umane	

Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-G-3.1 (Rev. 2), IAEA, Vienna (2024), <https://doi.org/10.61092/iaea.zjau-e8cs>

Quadro normativo e contesto italiano

- In Italia la radioprotezione è già attiva per **ambito medico, industriale, ricerca e decommissioning**
- Necessario **potenziamento infrastrutturale** per il nucleare
- Riferimenti principali:
 - **Standard AIEA**
 - Linee guida **ICRP**
 - Dati scientifici **UNSCEAR**
- Importante evitare **eccessivo conservatorismo**

Fase 1 – Prima della decisione sul programma nucleare

Obiettivi principali:

- Identificare nuovi rischi radiologici
- Adeguare i programmi esistenti

• Elementi chiave:

- Formazione e istruzione del personale
- Servizi di radioprotezione (dosimetria, taratura strumenti)
- Sistemi di registrazione delle dosi
- Strategie per la gestione dei rifiuti radioattivi

Fase 2 – Preparazione alla costruzione

• Azioni prioritarie:

- Aggiornamento della **normativa**
- Definizione dei **limiti e vincoli di dose** (lavoratori e pubblico)
- Avvio del **monitoraggio ambientale**
- Integrazione della radioprotezione nella **progettazione dell'impianto**
- Pianificazione di **reclutamento, formazione e approvvigionamento tecnico**

Fase 3 – Avvio operativo della centrale

• Prima dell'arrivo del combustibile:

- Programma di radioprotezione operativo
- Responsabili qualificati e certificati
- Sistemi di monitoraggio sul sito
- Servizio di dosimetria per i lavoratori
- Procedure per minimizzare l'esposizione (ottimizzazione)

• Ruolo dell'autorità di regolamentazione:

- Verifica della **conformità normativa**
- Controllo delle misure di protezione ambientale
- Validazione delle procedure di emergenza

Nucleare e Protezione dell'Ambiente

- La protezione dell'ambiente dagli effetti delle radiazioni ionizzanti rappresenta un obiettivo centrale della sicurezza nucleare. Secondo l'AIEA (**Safety Standards Series No. GSR Part 3**):
 - Specie animali e vegetali e della biodiversità
 - Risorse ambientali e servizi ecosistemici (produzione alimentare, acqua, suolo, aria)
 - Risorse per agricoltura, silvicoltura, pesca e turismo
 - Beni culturali, spirituali e ricreativi
- L'avvio di un programma nucleare richiede obbligatoriamente **valutazioni di impatto ambientale (VIA)** a supporto delle decisioni strategiche.
- A livello europeo, il nucleare è stato riconosciuto come **tecnologia sostenibile per la transizione energetica**, grazie alle basse emissioni climalteranti.
- Uno studio **UNECE (2022)** mostra che, tra le tecnologie a basse emissioni di gas serra, il nucleare presenta uno dei valori più bassi sull'intero ciclo di vita, inferiori anche a quelli dell'eolico.

Nucleare e Protezione dell'Ambiente

Fase 1 — Valutazioni preliminari

Prima di avviare un programma nucleare è necessario:

- Analizzare **impatti ambientali** positivi e negativi
- Verificare l'adeguatezza del **quadro normativo** nazionale
- Allinearsi agli obblighi internazionali
- Proporre aggiornamenti legislativi
- Definire responsabilità istituzionali
- Avviare consultazioni pubbliche

Fase 2 — Preparazione alla costruzione

- Aggiornare leggi e regolamenti ambientali
- Completare la **VIA** per il sito e il progetto specifico
- Rafforzare il **coordinamento tra autorità ambientali e nucleari**
- Raccogliere dati ambientali di base (acqua, suolo, aria, popolazione, uso del territorio)
- Analizzare trasporto degli effluenti ed esposizioni radiologiche

Fase 3 — Implementazione della centrale

- Durante la realizzazione e l'avvio dell'impianto:
 - Si completano le procedure autorizzative ambientali e nucleari
 - Si attiva un **programma di monitoraggio ambientale** e radiologico continuo
 - Si **verificano gli impatti** rispetto ai limiti autorizzati
 - Si applicano misure correttive in caso di superamento dei valori soglia
 - Si definiscono e controllano i limiti per gli scarichi radioattivi

- Sebbene la probabilità di un rilascio significativo di materiale radioattivo da una centrale nucleare sia molto bassa, la **preparazione alle emergenze** è un elemento fondamentale della sicurezza nucleare.
- Secondo il principio di **difesa in profondità dell'IAEA (livello 5)**, applicabile anche agli **SMR (Small Modular Reactors)**, devono essere garantite misure efficaci per mitigare le conseguenze di eventuali incidenti.
- Un sistema di risposta alle emergenze coinvolge più attori:
 - Autorità nazionali e locali
 - Protezione civile
 - Autorità di regolamentazione
 - Proprietario/operatore dell'impianto
- La normativa deve definire chiaramente **ruoli, responsabilità, coordinamento e comunicazione** tra tutti i soggetti coinvolti.

Fase 1 — Preparazione prima della decisione di avvio

In questa fase si definiscono i requisiti fondamentali per la gestione delle emergenze:

- Valutazione delle **capacità nazionali di risposta**
- Analisi delle infrastrutture disponibili
- **Pianificazione** delle risorse umane e tecniche
- Chiarezza sulle **responsabilità** istituzionali
- Valutazione della cooperazione internazionale (AIEA, Paesi confinanti)
- Adesione a strumenti giuridici internazionali

Fase 2 — Preparazione per costruzione e contratto

- Dopo la decisione di avvio del programma nucleare, si procede a:
 - Definizione delle organizzazioni di risposta nazionali e regionali
 - Creazione di un sistema di **coordinamento centrale**
 - Sviluppo di **un quadro integrato di risposta**
 - Rafforzamento dei sistemi di comunicazione
 - Identificazione e gestione delle criticità operative
 - Adozione di regolamenti tecnici specifici

Fase 3 — Implementazione della centrale

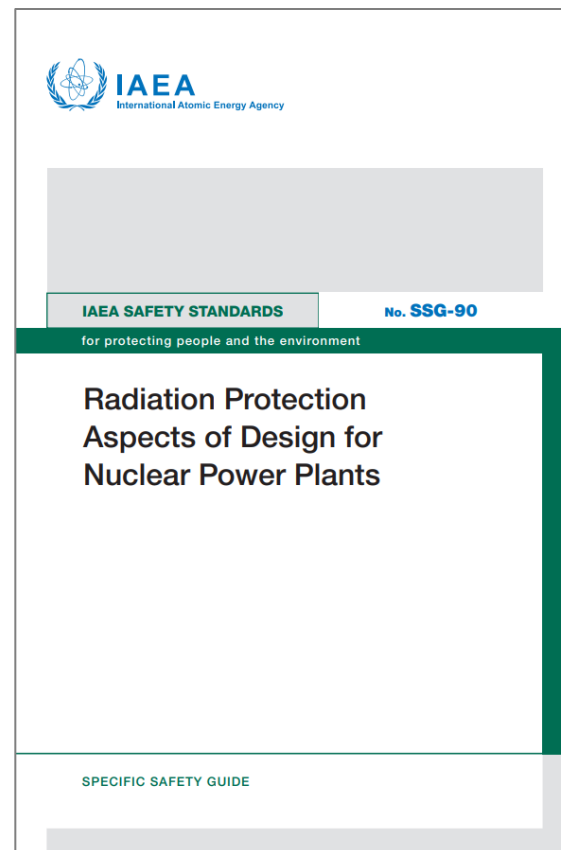
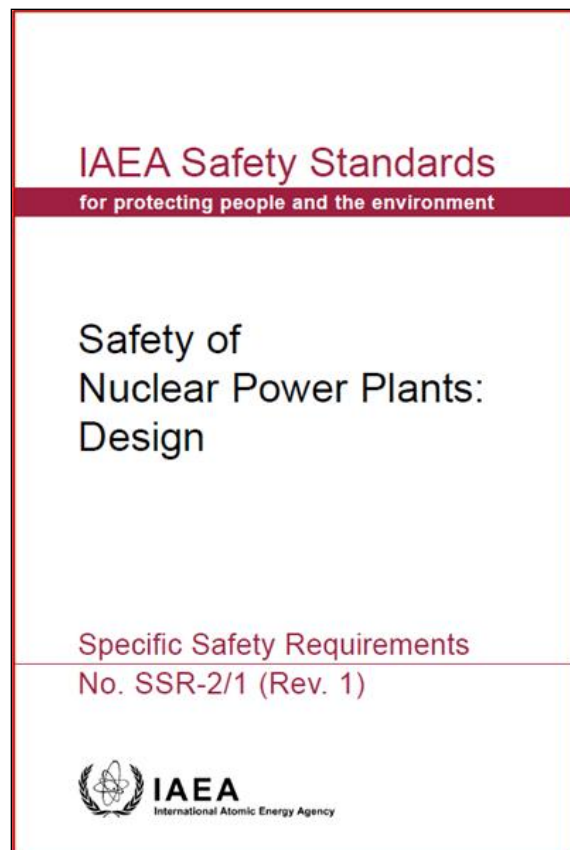
- Prima del caricamento del combustibile nucleare:
 - Le infrastrutture di emergenza devono essere completate e testate
- **I ruoli e le responsabilità** devono essere formalmente definiti
- Devono essere coordinati i piani tra impianto e autorità esterne
- L'ente regolatore deve verificare e approvare le disposizioni
- Devono essere svolte **esercitazioni periodiche** e programmi di formazione

Chernobyl (1986) — Dati UNSCEAR

- 134 casi di sindrome acuta da radiazione tra i lavoratori
- 28 decessi nei primi mesi
- Aumento di leucemie e cataratte solo per esposizioni elevate
- Circa 6.000 casi di tumore alla tiroide in bambini e adolescenti (associati al consumo di latte contaminato)
- 15 decessi entro il 2005
- Nessuna evidenza di altri effetti

Fukushima-Daiichi (2011) — Dati UNSCEAR 2021

- A fronte di oltre 20.000 vittime causate dal sisma e dallo tsunami nella regione, il rapporto UNSCEAR del 2021 riporta che:
“Non sono stati documentati effetti negativi sulla salute tra i residenti di Fukushima che siano direttamente attribuibili all'esposizione alle radiazioni dall'incidente accaduto alla centrale nucleare di Fukushima-Daiichi. Le stime rivedute della dose del Comitato sono tali che è improbabile che si possano rilevare futuri effetti sulla salute associati alle radiazioni...”.



Obietti di sicurezza

Radioprotezione e Sicurezza nella progettazione

Requirement 5

La progettazione di una centrale nucleare deve essere tale da garantire per le **dosi** dei **lavoratori** e i **membri del pubblico**:

- ✓ il rispetto dei **limiti**
- ✓ che siano mantenute al livello più basso ragionevolmente ottenibile (**ALARA**) in condizioni operative per l'intera durata di vita dell'impianto
- ✓ e che rimangano al di sotto dei valori accettabili e al livello più basso ragionevolmente ottenibile in seguito a **condizioni incidentali**

Requirement 81

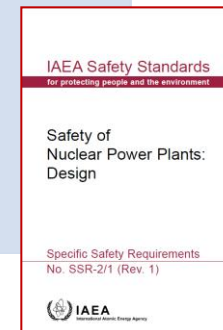
Devono essere adottate misure per garantire che le **dosi al personale** operativo della centrale nucleare:

- ✓ restino al di sotto dei **limiti** previsti
- ✓ siano mantenute al livello più basso ragionevolmente ottenibile
- ✓ vengano considerati i pertinenti **vincoli di dose**

Requirement 12

Nella fase di progettazione di una centrale nucleare, si dovrà prestare particolare attenzione all'inserimento di caratteristiche che facilitino:

- ✓ la gestione dei **rifiuti radioattivi**
- ✓ Il futuro **decommissioning** dell'impianto



Obietti di sicurezza

Radioprotezione per risposta all'emergenza

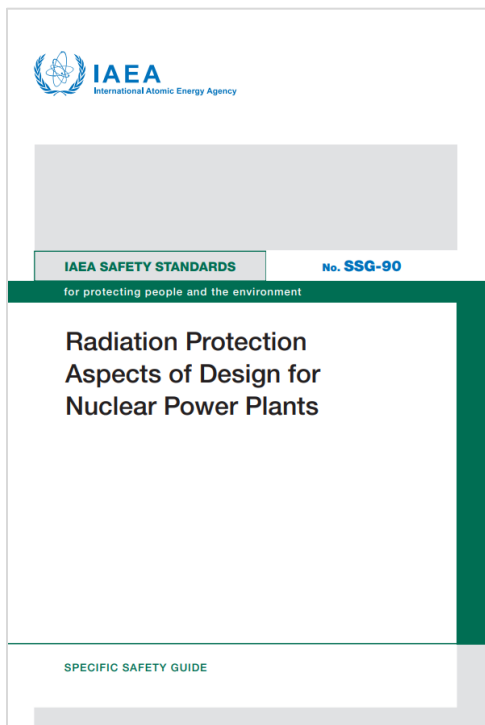
Emergenza sito

- È necessario adottare misure specifiche per garantire la protezione e la sicurezza di tutte le **persone presenti nel sito** in caso di emergenza nucleare o radiologica.
- Tali misure devono comprendere:
 - ✓ Punti di raccolta adeguatamente attrezzati, con monitoraggio continuo delle radiazioni;
 - ✓ Un numero sufficiente di **vie di fuga** sicure e facilmente accessibili;
 - ✓ **Sistemi di allarme** efficaci e altri mezzi per allertare e fornire istruzioni alle persone presenti, in qualunque condizione di emergenza.

Emergenza esterna sito

- All'interno delle zone e delle distanze previste dalla **pianificazione di emergenza**, devono essere adottate le seguenti misure:
 - ✓ **monitoraggio** tempestivo della contaminazione ambientale, dei rilasci radioattivi e dei livelli di esposizione della popolazione;
 - ✓ **valutazione continua** dei dati raccolti per supportare decisioni informate;
 - ✓ definizione e attuazione delle azioni di protezione e delle altre misure di risposta, sulla base delle valutazioni effettuate;
 - ✓ utilizzo di **criteri operativi** prestabiliti, conformi alla strategia di protezione adottata.





Obiettivi di sicurezza, limitazione della dose e ottimizzazione

Controllo delle sorgenti di radiazione e stima dei ratei di dose

Caratteristiche progettuali di radioprotezione per l'esercizio

Caratteristiche progettuali di radioprotezione in caso incidentale

Caratteristiche progettuali di radioprotezione per il decommissioning

Progettazione del monitoraggio delle radiazioni per esercizio, condizioni incidentali e decommissioning

Strategia di progettazione



Gli **obiettivi di progettazione** devono essere stabiliti fin dalle **fasi iniziali**

Vanno fissati gli obiettivi annuali di:

- **dose collettiva e individuale lavoratori** (inclusi dose media e dose massima)
- **dose individuale popolazione**



Tali obiettivi devono coprire sia le condizioni operative normali sia le interruzioni programmate, con **metodi di calcolo approvati** dall'autorità di regolamentazione.



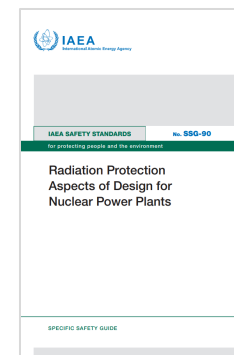
È fondamentale **bilanciare la riduzione dei rilasci** con l'esposizione del personale, evitando aumenti ingiustificati di dose.



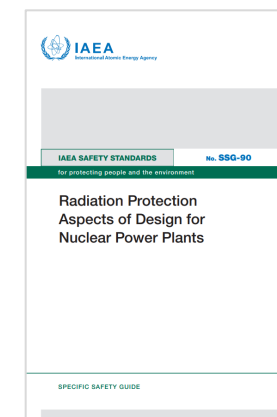
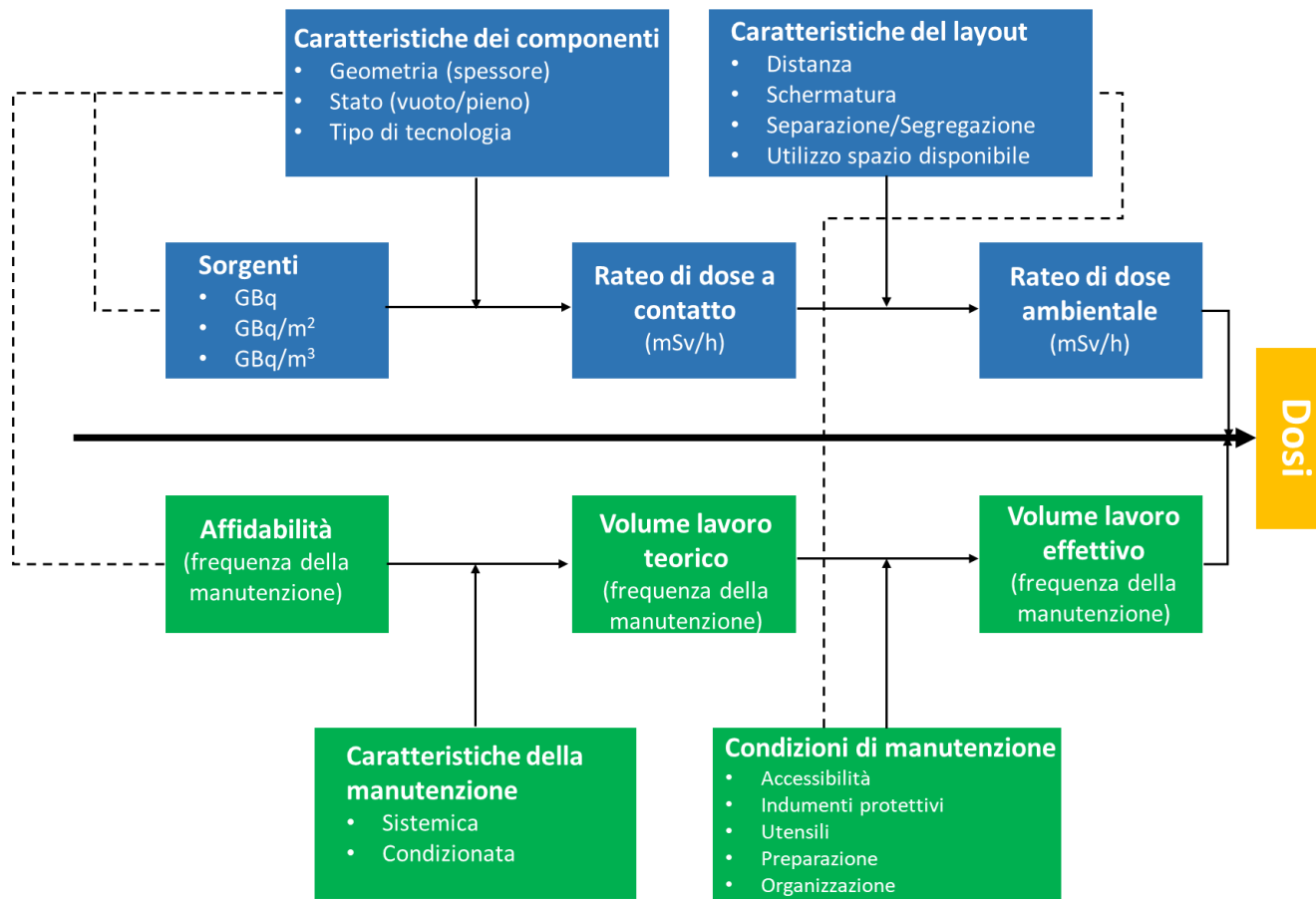
L'esperienza di altri impianti simili con buone prestazioni in radioprotezione può offrire utili riferimenti, adattando gli obiettivi alle specificità del nuovo progetto (es. potenza, materiali, combustibile, schermatura).

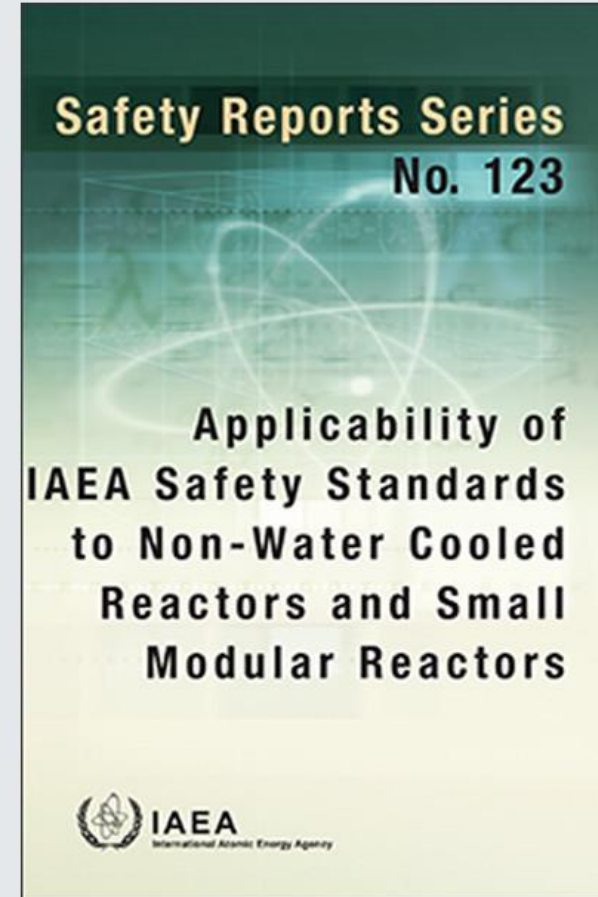
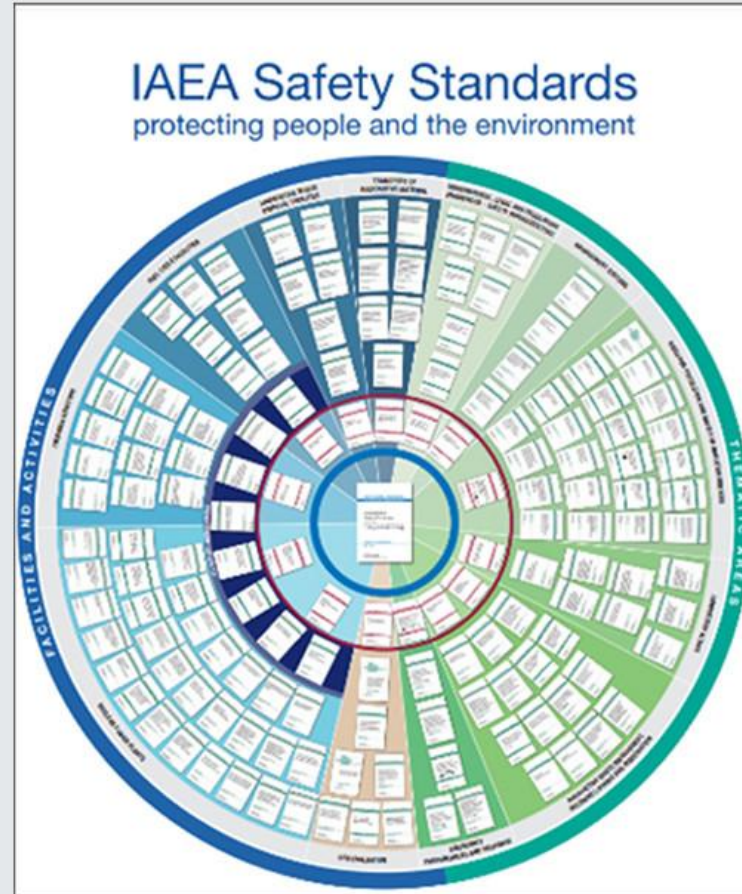


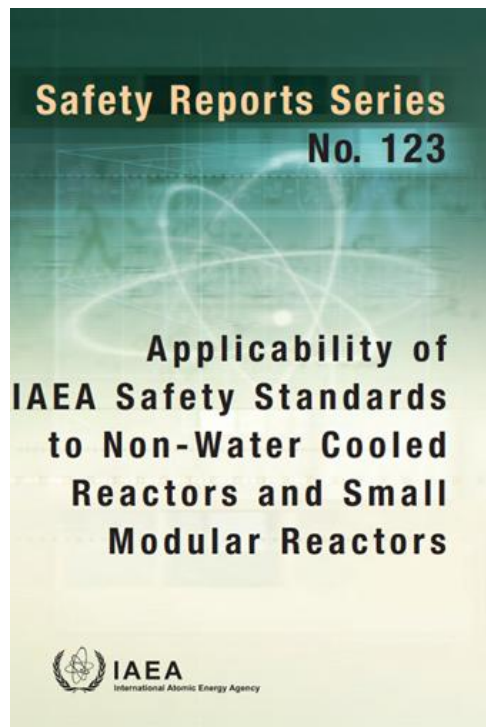
Raggiungere gli obiettivi prefissati non basta: può essere necessario **ottimizzare** ulteriormente il progetto per garantire una protezione radiologica efficace



Procedura di valutazione e ottimizzazione della dose





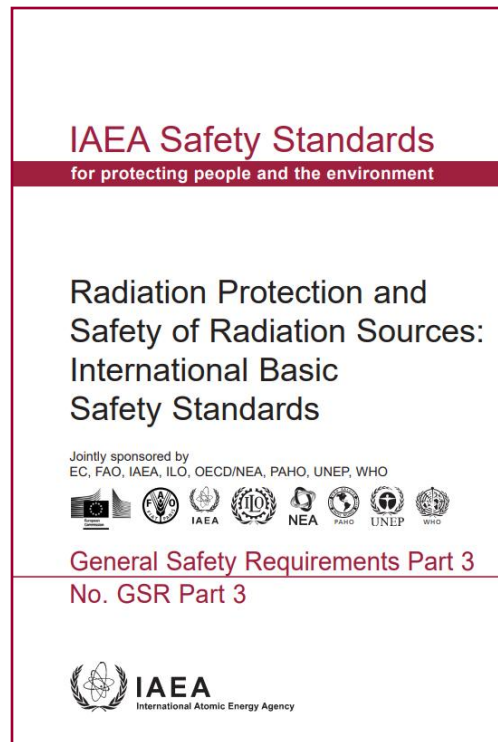


Member States have expressed significant interest in commercial deployment of other types of reactor, notably non-WCRs and small modular reactors (SMRs; water cooled, or non-water cooled).

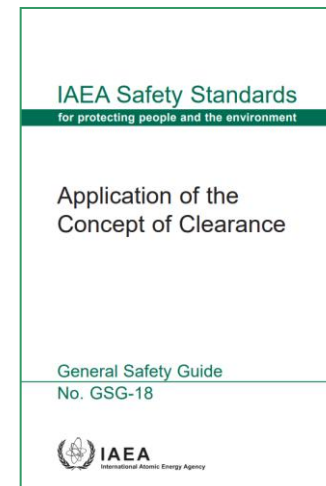
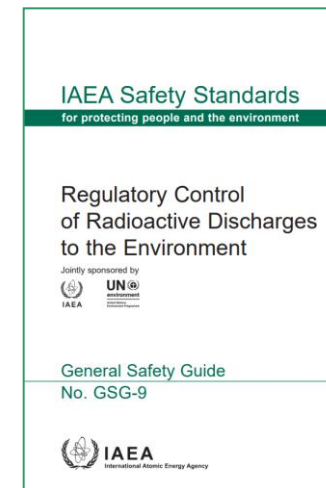
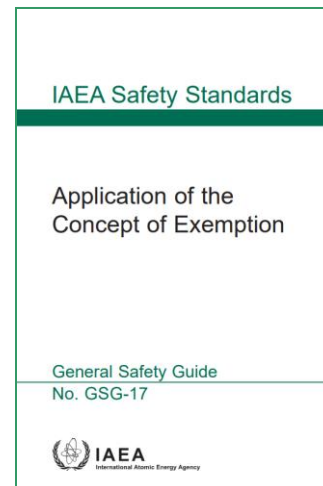
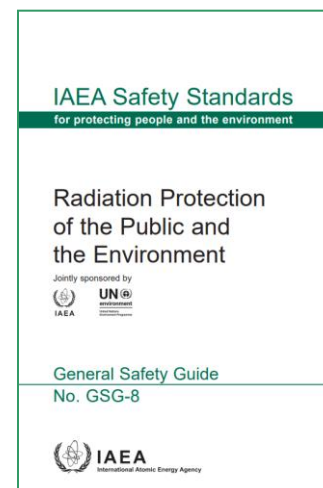
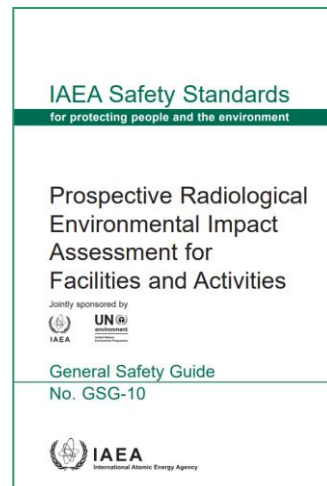
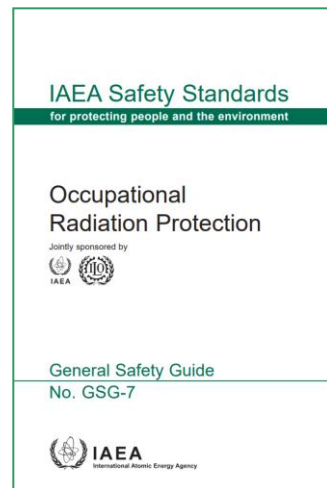
These reactor technologies are referred to in this publication as **'evolutionary and innovative designs' (EIDs)** for the sake of brevity

The objective of this publication is to present review of the applicability of IAEA safety standards to EIDs (including SMRs) — in particular, to consider whether the current requirements and recommendations are **applicable** to these technologies and to identify **any gaps**

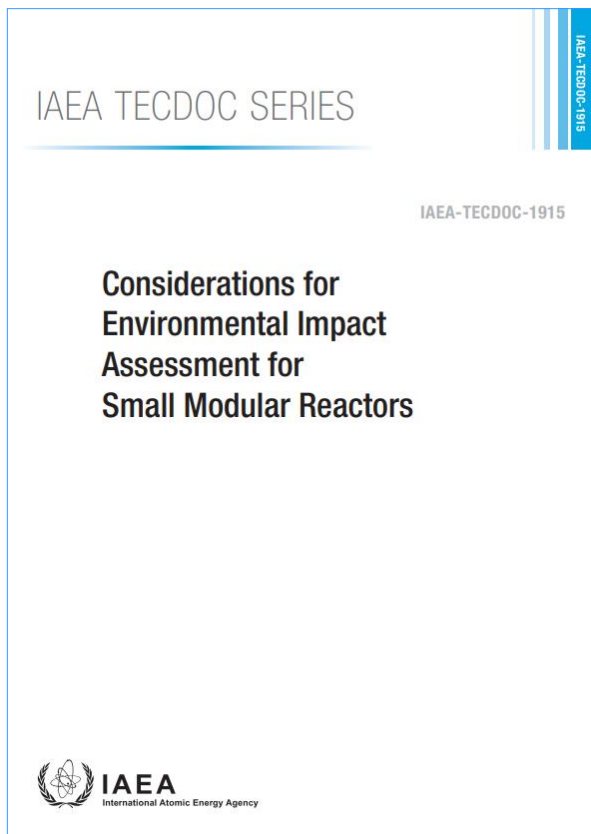
Radioprotezione



SAFETY REQUIREMENTS



SAFETY GUIDES



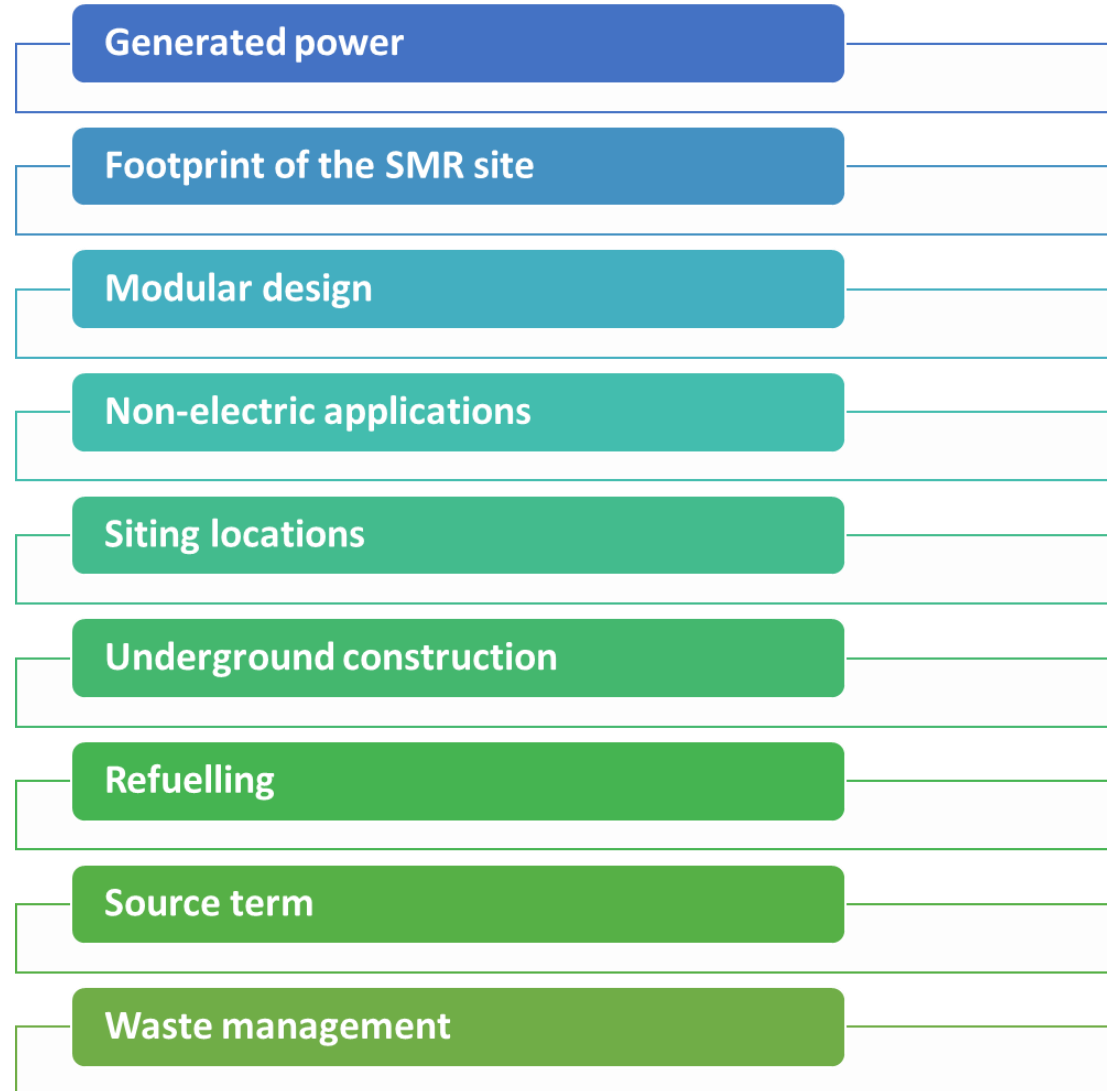
In this publication, SMRs are defined as advanced nuclear power plants (NPPs) that produce electric power up to 300 MW(e)

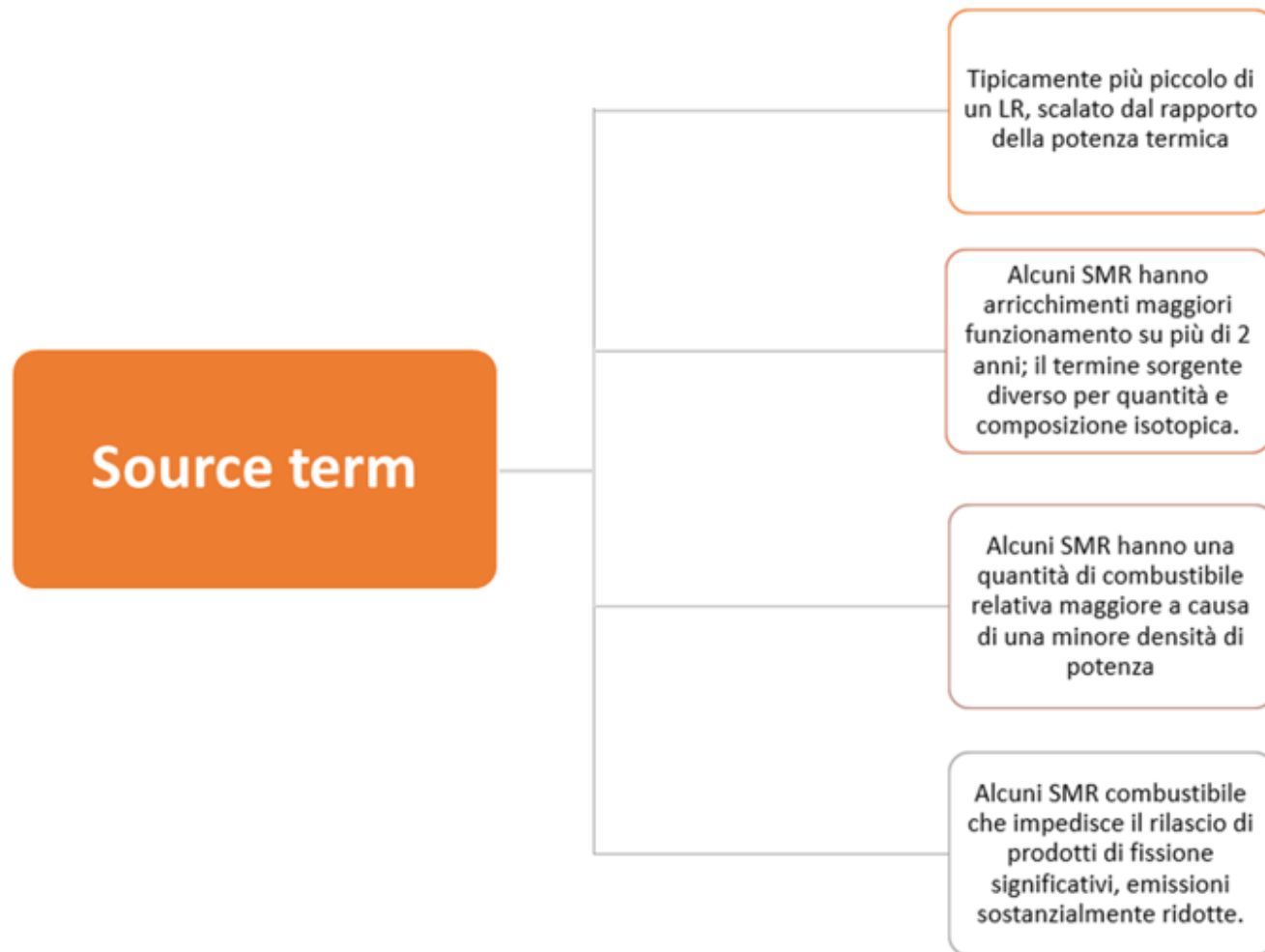
For practicality, the term 'large reactor (LR)' is used to mean 'large NPP' in this publication.

Descrizione generale impatto ambientale

- L'**EIA** (**Environmental Impact Assessment**) è un'analisi olistica che comprende i rischi potenziali **radiologici, ecologici e socioeconomici** connessi all'impianto nucleare in relazione al sito proposto
- In linea generale, la metodologia utilizzata per gli impatti radiologici ambientali per i grandi NPP è la stessa per gli SMR

Caratteristiche SMR che influenzano l'EIA





Impatto potenziale SMR

Effetti potenziali	Atmosfera	Suolo	Ambiente acquatico	Geologia idrogeologia	Fauna e flora marina	Fauna e flora terrestre	Salute uomo
Operation		Impatti più bassi per potenza e impronta.	Per SMR underground, impatto maggiore. Gli SMR in mare diminuzione della qualità dell'acqua		Gli SMR in mare possono alterare l'habitat	Per SMR in mare impatti ridotti	Valido il Safety Standard Series GSG-10 IAEA. Si dovrà tenere conto della diversa tipologia di SMR
Decommissioning		Per SMR underground, impatto maggiore. Per SMR in mare impatti più bassi	Gli SMR in mare impatto diretto sulla qualità dell'acqua		Gli SMR in mare possono alterare l'habitat		Valido il Safety Standard Series GSG-10 IAEA. Si dovrà tenere conto della diversa tipologia di SMR

Impatto in condizioni incidentali

- Per gli SMR, che utilizzano **tecnologie e tipi di combustibile diversi** da quelli tradizionali, ci possono essere delle differenze in entità e natura del termine sorgente
- Si prevedono **emissioni radiologiche inferiore** per gli SMR rispetto agli LR
- Per gli **SMR modulari** negli scenari incidentali prendere in considerazione quelli che coinvolgono tutti i moduli nel sito.
- Le differenze tecnologiche possono influenzare l'applicabilità dei **codici di calcolo** per la stima dei termini sorgente